

Studijní program: N2612 / Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Mechatronika

UNIVERZÁLNÍ CNC SYSTÉM

UNIVERSAL CNC SYSTEM

Diplomová práce

Autor: **Bc. František Mejdr**

Vedoucí práce: **Ing. Leoš Beran, Ph.D.**

V Liberci 13. 5. 2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. František Mejdr**
Osobní číslo: **M11000279**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Univerzální CNC systém**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Navrhnete mechanické uspořádání kartézského souřadného systému.
2. Navrhnete el. pohony s DC motory pro pohyb os X, Y a Z.
3. Navrhnete zapojení vybraných komponentů.
4. Realizujete CNC řídicí systém pomocí techniky BaR.
5. Výsledky pečlivě zdokumentujete.


Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 40–50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] **PLÍVA, Zdeněk; DRÁBKOVÁ, Jindra.** Metodika zpracování diplomových, bakalářských a vědeckých prací na FM TUL. Vyd. 1. Liberec : Technická univerzita, 2007. 40 s. Dostupné z: http://www.fm.tul.cz/files/jak_psat_DP.pdf. ISBN 978-80-7372-189-3.
- [2] **AUTOMATION, B&R.** Controls - training text. Austria: [s.n.], 2008. 205 s.
- [3] **AUTOMATION, B&R.** Motion - training text. Austria: [s.n.], 2008. 150 s.
- [4] **ZELENÝ, Petr.** Návrh a konstrukce prototypu víceúčelového CNC stroje : teze disertační práce. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2006. 20 s. Teze disertační práce (Ph.D.) - Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, 2006. ISBN 80-7372-039-6.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Leoš Beran, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Diblík, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Datum zadání diplomové práce: **10. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2013**


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Bc. Martinu Vojířovi, který mi poskytnul část programu, která umožňuje řízení stejnosměrných motorů. Zvláště bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Leoši Beranovi, Ph.D. za motivaci, podporu a veškeré vynaložené úsilí k realizaci celého projektu.

Práce vznikla za finanční podpory projektu Otevřená univerzita, reg.číslo

CZ.1.07/2.3.00/35.0036.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí univerzálního tříosého CNC systému. Řídicí systém je realizován pomocí automatizační techniky firmy B&R. Práce zahrnuje návrh a konstrukci rozvaděče, instalaci příslušných komponent řídicího systému, návrh pohonů, výpočty technických parametrů a vytvoření elektrotechnické dokumentace. Práce dále řeší softwarovou implementaci CNC systému do PLC automatu, který na základě zadaného obráběcího programu interpoluje polohy pro všechny tři osy. Pohony CNC systému jsou realizovány kuličkovými šrouby a vysoce dynamickými stejnosměrnými motory. Řízení motorů je řešeno výkonovým modulem vybaveným PWM kanály.

Výsledkem práce je sestavený a naprogramovaný funkční CNC stroj, který disponuje základními funkcemi pro načtení obráběcího programu a jednoduchý provoz.

Klíčová slova: CNC systém, DC motor, tři osy, univerzální

Abstract

This diploma thesis deals with the design and construction of a universal three-axis CNC system. The control system is implemented using automation of B&R company. This diploma thesis includes the design and construction of the switching cabinet, installation of the control system components, the drive sizing, calculations of technical specifications and creation of electrical documentation. The work also describe software implementation of the CNC to the PLC, which interpolates the position for all three axes based on the specified machining program. The drives of CNC system are assembled by using ballscrews and high dynamic DC motors. The control drive is performed by power module equipped with PWM channels.

The result is assembled and programmed functional CNC machine that has the basic function to retrieve the machining program and simple to operate.

Keywords: CNC system, DC motor, three axis, universal

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Přehled komerčních řešení obráběcích strojů	11
2.1	CNC frézky	11
2.2	Řídicí systémy obráběcích strojů	12
3	Návrh konstrukce stroje	14
3.1	Požadované vlastnosti.....	14
3.2	Návrh mechanického uspořádání kartézského souřadného systému	14
3.3	Návrh rozvaděče pro řídicí systém	15
3.4	Výpočty požadovaných parametrů při obrábění	16
3.4.1	Výpočet výkonu vřetene	16
3.4.2	Výpočet sil při obrábění.....	18
4	Návrh pohonů	19
4.1	Požadované vlastnosti pohonů.....	19
4.2	Dimenzování pohonů.....	19
4.2.1	Návrh převodů	20
4.2.2	Výpočet hnacího krouticího momentu.....	20
4.2.3	Volba motorů	20
4.2.4	Volba snímačů polohy	21
4.3	Určení výsledných parametrů pohonů	22
4.3.1	Výpočet sil lineárních posuvů.....	23
4.3.2	Výpočet rozlišení	24
4.3.3	Určení maximálních povolených rychlostí posuvů	24
4.3.4	Výpočet maximálního zrychlení	24
4.4	Přehled výsledných parametrů pohonů.....	25
5	Řídicí systém CNC	26
5.1	Softwarový koncept CNC řízení.....	26

5.2	Použitý hardware	28
5.2.1	Průmyslový počítač.....	28
5.2.2	Vstupně výstupní moduly	29
5.2.3	Napájení	30
5.3	Zapojení komponentů	31
6	Implementace CNC pomocí ARNC0	33
6.1	Knihovna ARNC0.....	33
6.2	Vytvoření CNC systému.....	33
6.2.1	Vložení os	33
6.2.2	Vložení CNC.....	34
6.2.3	Přiřazení os k CNC	35
6.2.4	Program ovládání	36
7	Přehled dosažených výsledků a technických parametrů.....	38
8	Závěr	39
	Literatura.....	41
	Přílohy.....	43

Seznam použitých zkratek a značek

CNC	- číslíkové řízení počítačem (computer numeric control)
NC	- číslíkové řízení (numeric control)
SDC	- inteligentní řídicí struktura (smart device controller)
PLCopen	- standard knihoven a funkcí pro řízení pohonů
PWM	- pulsně šířková modulace (pulse width modulation)
PLC	- programovatelný logický automat (programmable logic controller)
DC	- stejnosměrný proud
CAD	- počítačem podporované projektování (computer-aided design)
CAM	- počítačem podporovaná výroba (computer-aided manufacturing)
HMI	- rozhraní mezi strojem a člověkem (human-machine interface)
IRC	- inkrementální rotační snímač (incremental rotary encoder)
DIN lišta	- lišta dle ČSN EN 60715

Seznam obrázků

Obr. 2.1 COMAGRAV MISTRAL 900 [3].....	12
Obr. 2.2 SINUMERIK 840Di sl [4].....	13
Obr. 2.3 HEIDENHAIN TNC 640 [6].....	13
Obr. 3.1 Navržený model rozvaděče	16
Obr. 4.1 Maxon RE50 [10]	21
Obr. 4.2 IRC Snímač SICK DBS35 [11]	22
Obr. 4.3 Koncový mikropsínač.....	22
Obr. 5.1 Softwarový koncept.....	27
Obr. 5.2 Dekodér a path generator.....	28
Obr. 5.3 PowerPanel 5PP581 [12].....	29
Obr. 5.4 Modul X20MM4456 [12].....	30
Obr. 5.5 Napájecí zdroje Phoenix Contact [13].....	31
Obr. 5.6 Blokové schéma zapojení	32
Obr. 6.1 Princip SDC	34
Obr. 6.2 Nastavení mapovací tabulky.....	34
Obr. 6.3 Přiřazení os k CNC	35
Obr. 6.4 Stavový diagram pro základní řízení CNC.....	37

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 parametry motoru RE50 370357	21
Tabulka 4.2 Parametry použitých komponent	23
Tabulka 4.3 Výsledné parametry pohonů	25
Tabulka 5.1 Technické údaje průmyslového počítače.....	28
Tabulka 6.1 Přehled příkazů pro ovládání CNC.....	36

1 Úvod

V oblasti obrábění materiálů je v současné době z velké části využíváno výpočetní techniky. Využití počítače pro řízení obráběcích strojů zvyšuje přesnost a rychlost opakované výroby, nahrazuje práci člověka a tím zvyšuje produktivitu práce. Stroje se mohou velmi rychle přizpůsobit k výrobě jiných součástí, což vede ke snižování výrobních nákladů.

První číslicově řízené stroje byly vyvinuty v padesátých letech dvacátého století. Byly označovány jako NC stroje a řízení probíhalo programem, který byl sekvenčně načítán z děrného štítku. Postupem času byly tyto stroje vybavovány počítačem, což znamenalo zrod CNC strojů. U CNC stroje, na rozdíl od NC, kdy byl zpracováván pouze jeden blok, je část programu načítána do operační paměti a sleduje několik bloků napřed. Tím je systém schopen reagovat rychleji. Díky dnešním CAD a CAM softwarům, počítač výrazně usnadní a urychlí programování stroje a uchová data pro jejich opětovné použití. Ceny CNC strojů se vzhledem k jejich výkonům snižují a postupně se stávají nezbytností v každé dílně [1],[2].

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a zkonstruovat univerzální CNC systém, který je možné použít pro různé aplikace, výuku a na prezentační účely Technické univerzity v Liberci.

Hlavním úkolem bylo realizovat řídicí systém pomocí automatizační techniky firmy B&R. Pro řízení pohonů se běžně používají servozesilovače ACOPOS, které jsou určeny pro střídavé synchronní motory nebo krokové motory. V našem případě však byla zvolena jiná varianta, která je sice komplikovanější, ale podstatně levnější. Použity jsou stejnosměrné motory řízené modulem obsahujícím výkonové kanály s možností pulzně šířkové modulace. Výhodou této koncepce je, že není nutné mít několik servozesilovačů, ale postačí jeden výkonový modul, který dokáže řídit až 4 stejnosměrné motory.

Návrh, konstrukce a zprovoznění CNC stroje je rozděleno mezi dva řešitele.

František Mejdr řeší návrh pohonů, elektroinstalaci a implementaci CNC. Jan Šotek řeší HMI rozhraní a mechanickou konstrukci.

2 Přehled komerčních řešení obráběcích strojů

V této kapitole je pro přehled uvedeno několik dostupných CNC zařízení, které mají souvislost se systémem řešeným v této práci. V první části je popsáno CNC zařízení firmy COMAGRAV, které je obdobou navrhovaného stroje. Dále jsou uvedeny dva nejznámější řídicí systémy CNC - Siemens SINUMERIK a HEIDENHAIN.

2.1 CNC frézky

COMAGRAV je český výrobce CNC strojů pro reklamní výrobu, průmyslové zpracování kovů, dřeva, pěny a plastů. Mezi sortiment firmy patří široká škála CNC velkoplošných routerů, plotterů a gravírovacích frézek.

Jako vzorový příklad pro srovnání s naším systémem bylo vybráno zařízení COMAGRAV MISTRAL. Jedná se o výkonnou multifunkční frézku určenou pro gravírování, frézování, řezání a skenování. Stroj má konstrukci z ocelových a hliníkových dílů, která zajišťuje dobrou tuhost a stabilitu. Nabízeny jsou varianty pohonů s krokovými motory i servomotory. Ve všech osách jsou použity kuličkové šrouby a přesné kuličkové lineární vedení. Jako řídicí systém je použit PILOT 3D kontrolér pro Windows XP/Vista 32-bit. Stroj může být řízen standardním osobním počítačem.

Jednou z možností výbavy je mechanický nebo laserový 3D skener. Skenerem je možné vkládat modely do PC a poté je upravovat nebo přímo kopírovat. Další možností rozšíření je například kamerový systém. Ten dokáže zaměřit potištěný motiv na pracovní ploše a dráhu patřičně natočit, nebo upravit rozměr tak, aby tisk s drahou nástroje pasovaly přesně. Kamerový systém pracuje se vřetenem, oscilačními noži i kombinovanými hlavami [3].

Cena zařízení je zhruba 400 000 Kč bez DPH

parametry stroje COMAGRAV MISTRAL 900:

pracovní plocha: 685 × 990 mm

celkové rozměry: 107 × 157 × 127 cm

hmotnost: 220 kg

rozlišení: 0.00625 mm

rychlosti posuvu: 0,5 – 100 mm/s

zdvih osy Z: 130 mm

světlost pod portálem: 140 mm

výkon vřetene: 2000 W, 24 000 RPM



Obr. 2.1 COMAGRAV MISTRAL 900 [3]

2.2 Řídicí systémy obráběcích strojů

Siemens SINUMERIK

Společnost Siemens nabízí řadu řídicích systémů určených pro obráběcí stroje, která má označení Sinumerik. První systém řady Sinumerik vznikl v roce 1964. Po několika desítkách let vývoje je systém využíván po celém světě v řadě průmyslových odvětví, například v automobilovém průmyslu nebo v letectví.

Aktuální nabídka řídicích systémů Sinumerik obsahuje vývojovou řadu se systémy 802, 810D, 840Di a 840D a novou vývojovou řadu s označením sl (solution line) 802D sl, 840Di sl a 840D sl. Spolu s integrovaným PLC systémem S7-300 je tento systém určen pro střední a vysoké nároky. Umožňuje řízení až 31 os, vysokorychlostní obrábění, má integrované bezpečnostní funkce a mnoho dalších funkcí. Systémy disponují ovládacím rozhraním Sinumerik Operate, což jsou moderní obslužné displeje pro efektivní řízení stroje.

Pro méně náročné aplikace je k dispozici systém Sinumerik 802D určený pro soustruhy a frézky menší a střední výkonnosti.

Sestava řízení obráběcího stroje se skládá z řídicího systému Sinumerik, pro řízení motorů je dále zapotřebí Simodrive, což je kompaktní digitální modulární pohonný systém. Systémem lze řídit asynchronní i synchronní motory [4].



Obr. 2.2 SINUMERIK 840Di sl [4]

HEIDENHAIN

Německá firma Heidenhain nabízí kompletní řadu CNC řídicích systémů, které jsou určeny pro všechny aplikace od jednoduchého frézování až po vysokorychlostní obrábění. Systémy jsou rozděleny podle použití na dvě kategorie. Řada TNC určená pro frézky a frézovací centra a řada MANUAL plus 620 pro víceúčelové CNC řízení soustruhů.

Pohony u systému Heidenhain jsou řízeny digitálními měniči. K dispozici jsou jak kompaktní měniče obsahující výkonové části až pro 4 osy, tak i modulární měniče. Modulární měniče jsou konstruovány pro stroje s až 13 osami. Napájecí zdroje jsou nabízeny s výkony 22 až 55 kW. K měničům je možné připojit motory pro posuvy s krouticím momentem od 0.4 Nm do 62.5 Nm a vřetenové motory s výkony od 5.5 kW do 40 kW. Řídit lze motory synchronní i asynchronní [6].



Obr. 2.3 HEIDENHAIN TNC 640 [6]

CNC systém B&R

Firma B&R nabízí možnost sestavit a naprogramovat vlastní CNC řídicí systém. Použít lze běžný PLC automat B&R, do kterého je možné CNC systém softwarově implementovat. Řešení je podrobně popsáno v kapitole 5.

3 Návrh konstrukce stroje

Před samotným návrhem konstrukce bylo nutné vědět, jakému účelu bude stroj sloužit a jaké požadujeme vlastnosti. Na základě požadovaných vlastností dále byly provedeny simulace a výpočty, podle kterých jsou určeny potřebné rozměry, parametry konstrukčních dílů a konfigurace jednotlivých částí pohonů. Tato kapitola řeší základní uspořádání souřadného systému, konstrukci rozvaděče řídicího systému a výpočty potřebné k dalším krokům při dimenzování pohonů.

3.1 Požadované vlastnosti

Konkrétní účel tohoto zařízení není zcela specifikován. Jedná se o univerzální zařízení, které může být využito k různým účelům, například jako plotter, 3D tiskárna nebo frézka. Zařízení by rovněž mohlo být použito i v oblasti výroby nanovláken, která je předmětem výzkumu a vývoje na TUL. Zajímavé možnosti může zařízení nabídnout při automatizovaném měření magnetických polí. Všechny tyto účely mají společný požadavek na maximální přesnost i rychlost. Pokud bude zařízení využito jako frézka, je kladen požadavek i na dostatečnou sílu.

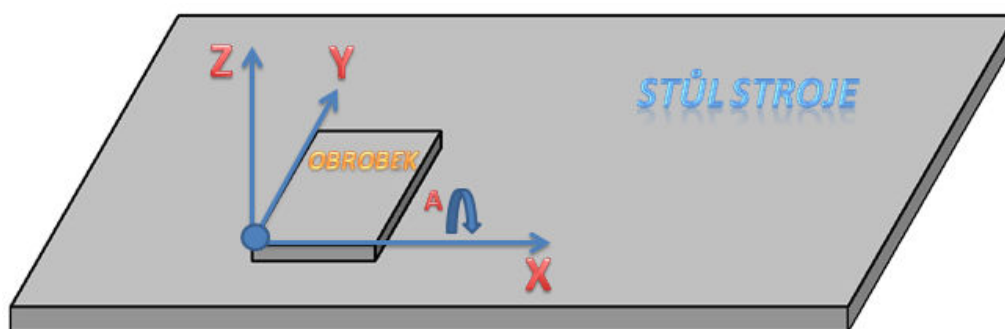
Na základě možných využití byly stanoveny požadované vlastnosti zohledněné při návrhu dílčích komponent celého systému:

- přesnost polohování v řádech setin až tisícín milimetru
- bezvůlový chod
- rychlost posuvu 100 mm/s
- možnost obrábění hliníku s použitím frézy o průměru až 8 mm

3.2 Návrh mechanického uspořádání kartézského souřadného systému

Souřadný systém obráběcích strojů je definován normou ČSN ISO 841 [7]. Tato norma popisuje souřadnicový systém stroje vzhledem k primárním pohybům jednotlivých číslíkově řízených strojů a k přidruženým pohybům stroje. Z normy vychází

pravotočivý kartézský souřadný systém. Jedná se o pravoúhlou souřadnou soustavu s posuvnými osami X, Y, Z. Kladný smysl pohybu je myšlen směrem narůstání obrobku. Hlavní osou je osa Z, která je rovnoběžná s osou vřetene. Osa X leží v rovině upínání obrobku. Dále lze definovat osy A,B,C, které označují rotační pohyby kolem os X, Y, Z. Souřadný systém je znázorněn na obrázku 3.1. V návrhu je počítáno s jednou rotační osou umožňující rotaci obrobku kolem osy X. Toto zařízení lze dokoupit a jednoduše připevnit k pracovní desce stroje.



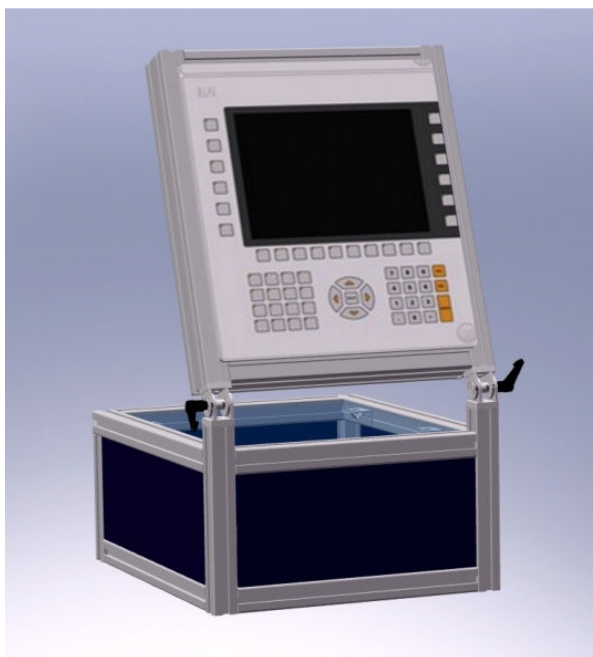
Obr. 3.1 Souřadný systém stroje

3.3 Návrh rozvaděče pro řídicí systém

Požadavkem bylo navrhnout rozvaděč, ve kterém budou umístěny potřebné komponenty včetně řídicího systému. Část rozvaděče by měla mít průhlednou stěnu, aby bylo možné kontrolovat stav komponent pomocí signalizačních prvků a také by měla být možnost nahlédnutí na použitou techniku pro prezentační účely.

Byl navržen model rozvaděče, jehož konstrukce je tvořena z konstrukčních hliníkových profilů o rozměru 30x30 mm. Navržený model rozvaděče je na obrázku 3.1. Výrobní dokumentace je v příloze Příloha č. 2 -.

Spodní část tvoří prostorný rozvaděč tvaru kvádru, ve kterém jsou umístěny všechny potřebné komponenty (jističe, napájecí zdroje, I/O moduly, svorkovnice). Na vrchní straně rozvaděče je připevněn rámeček, ve kterém je umístěn panel s řídicím průmyslovým PC. Obsluha si tak může panel s obrazovkou naklopit do požadované polohy a tuto polohu zafixovat pomocí kloubů, které mají možnost zajištění.



Obr. 3.1 Navržený model rozvaděče

Součástí elektroinstalace je také malý podružný rozvaděč, který je umístěn na rámu stroje. Na svorkovnici tohoto rozvaděče jsou svedeny vodiče od motorů, snímačů polohy a ovládacích prvků. Podružný rozvaděč je stejně tak jako hlavní rozvaděč vybaven dvěma konektory. Hlavní rozvaděč je s podružným rozvaděčem spojen propojovacími kabely s konektory, díky čemuž je možné zařízení od sebe fyzicky oddělit a umožnit tak snazší transport.

3.4 Výpočty požadovaných parametrů při obrábění

Nezbytným parametrem pro navržení konstrukce, ale především pro následné dimenzování pohonů je síla, kterou pohon musí vyvinout. Určení této veličiny není úplně snadné ani jednoznačné. Stanovení obráběcí síly bylo provedeno metodou, při které nejprve na základě simulace obrábění určíme potřebný výkon vřetene. Přepočtem výkonu dle vztahu (1) získáme požadovanou obráběcí sílu.

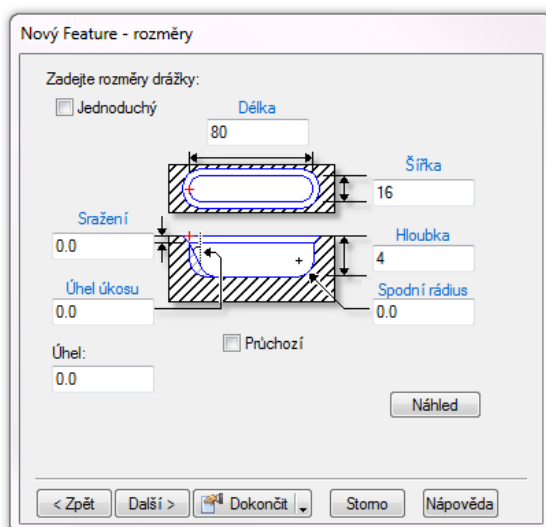
3.4.1 Výpočet výkonu vřetene

K určení potřebného výkonu vřetene byl použit program FeatureCAM od firmy DELCAM [9]. Jedná se o CAD/CAM software určený pro CNC programování frézovacích center a soustruhů. K vytvoření NC kódu není nutné složitě definovat jednotlivé operace a mnoho dalších parametrů. Systém sám dle vestavěných nebo uživatelských kritérií navrhne optimální a korektní řešení. Mezi funkce programu patří

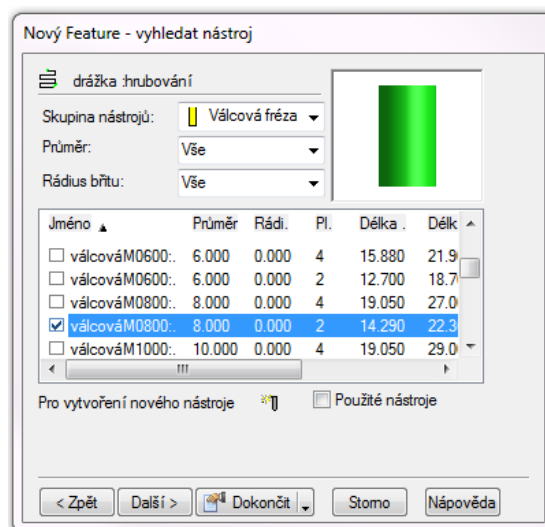
simulace obrábění a zobrazení grafu výkonu potřebného pro zvolenou operaci. Této funkce bylo využito pro určení potřebného výkonu obráběcího vřetene.

Zkušební verze programu je volně ke stažení na internetových stránkách výrobce. Omezení zkušební verze spočívá pouze v nedostupnosti možnosti vytvoření NC kódu a ukládání projektu. Funkce pro vytvoření dráhy nástroje a simulace obrábění s vykreslením grafu výkonu jsou dostupné.

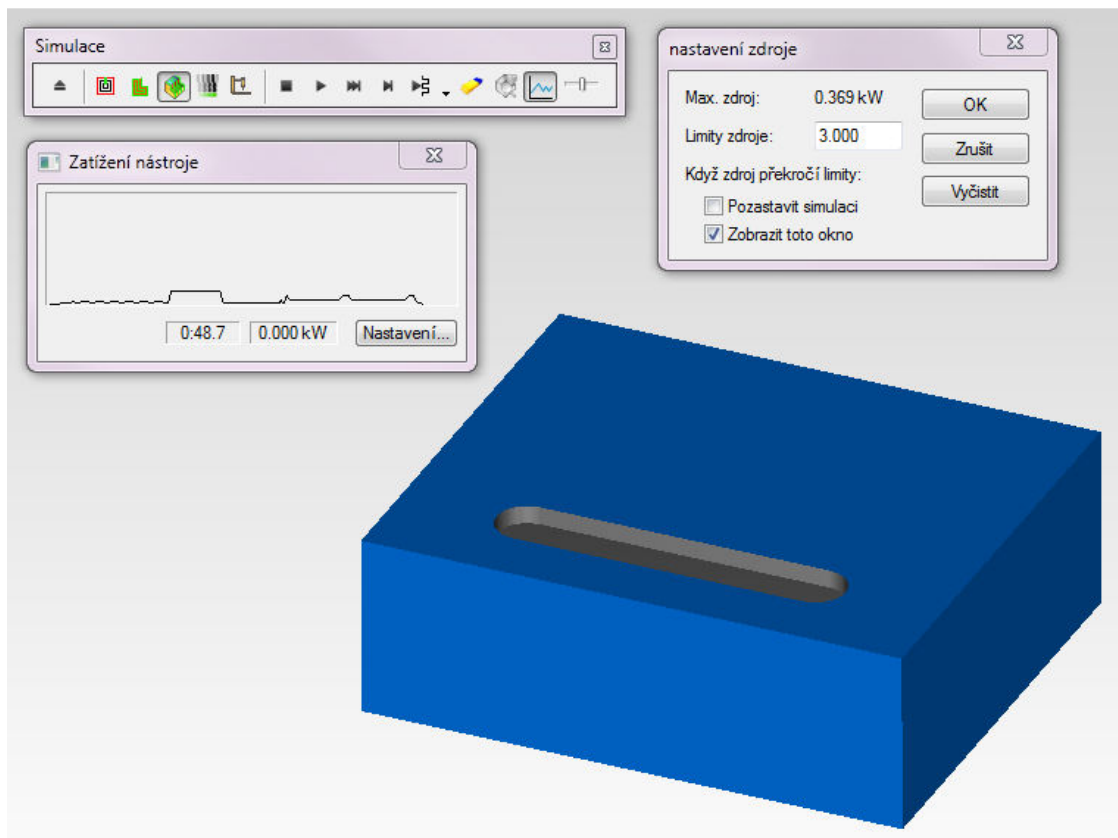
Určení potřebného výkonu bylo provedeno pomocí simulace frézování drážky o hloubce 4 mm do hliníku. Jako nástroj byla zvolena válcová fréza o průměru 8mm. Parametry simulace jsou stanoveny tak, aby se dosáhlo předimenzování pohonů. Při otáčkách 5200 ot./min a rychlosti posuvu 832 mm/min byl vypočten výkon 369 W. Výsledek této simulace je však ideální hodnotou, kde není počítáno s negativními vlastnostmi jako je otupení nástroje, nehomogenita materiálu, nebo nabalování třísek na nástroj. Je proto potřeba počítat s určitou rezervou. Hodnota byla tedy upravena koeficientem bezpečnosti ($k=2,5$), z čehož vychází potřebný výkon $P_v = 923$ W. S touto hodnotou budeme při návrhu dále počítat.



Obr. 3.2 Nastavení rozměrů drážky



Obr. 3.3 Výběr nástroje



Obr. 3.4 Simulace obrábění

3.4.2 Výpočet sil při obrábění

Síla, která zatěžuje konstrukci stroje při obrábění a podle které byly dimenzovány pohony, byla určena na základě výsledných parametrů z výše uvedené simulace obrábění. Obráběcí síla byla vypočtena ze znalosti výkonu vřetene, poloměru nástroje a otáček vřetene dle následujícího vztahu:

$$P_v = \frac{2\pi \cdot n_v \cdot F \cdot r_n}{60} \Rightarrow F = \frac{30 \cdot P_v}{\pi \cdot n_v \cdot r_n} = \frac{30 \cdot 923}{\pi \cdot 5200 \cdot 0.004} = 424 \text{ N} \quad (1)$$

P_v - výkon vřetene [W]; n_v - otáčky vřetene [min^{-1}]; r_n - poloměr nástroje [m]

Hodnota nemusí být přesná, ale je dostatečně naddimenzovaná pro operace, ke kterým je stroj určen. Síla $F = 424 \text{ N}$ je pro další výpočty uvažována jako výchozí.

4 Návrh pohonů

Hlavním parametrem pro dimenzování pohonů je výše vypočtená výchozí obráběcí síla. Síla působící při frézování je ve srovnání se silami působícími při dynamickém pohybu jednoznačně největší. Proto je pohon dimenzován na základě této výchozí síly. Dalším důležitým parametrem pro návrh pohonu je rychlost posuvu. Tato hodnota byla určena z normovaných tabulek a z automatického návrhu optimálního řešení programu FeatureCAM.

Parametry jako je maximální hodnota rychloposuvu, maximální zrychlení, opakovatelnost a rozlišení jsou podřízeny technickými možnostmi konstrukce stroje a zvolenému pohonu.

4.1 Požadované vlastnosti pohonů

Na pohony jsou kladeny takové požadavky, aby výsledné parametry stroje vyhovovaly stanoveným vlastnostem. Parametry by měly být ve srovnání s komerčně vyráběnými stroji shodné nebo lepší. Pokud jako vzor bereme stroj Comagrav, který je uvedený v kapitole 2.1, pohon našeho stroje by měl mít rozlišení alespoň 0,00625 mm a maximální rychlost posuvu 100 mm.s^{-1} a vyšší. Síla, kterou by měl pohon dokázat vyvinout, výrobci většinou definují nepřímou, a to materiálem, který lze obrobit. V našem případě je požadavek na možnost obrábění hliníku. Velikost síly je pro návrh pohonu klíčová. Síla byla vypočtena dle vztahu (1) v předchozí kapitole.

4.2 Dimenzování pohonů

Pohony je zapotřebí nadimenzovat tak, aby výsledná síla byla dostatečně vysoká. Zároveň jsou kladeny nároky na co nejvyšší přesnost zařízení. Pro pohon jsou použity stejnosměrné motory, které se vyznačují poměrně vysokými otáčkami, ale nízkým krouticím momentem. Pohon by proto bylo dobré zpřevodovat do pomala. Použití převodovky má však za následek vznik vůlí a tím nežádoucí snížení přesnosti stroje. Další možností jak snížit rychlost a zvýšit krouticí moment je použití řemenového převodu. Tento převod také přináší určité nevýhody. Dochází například ke ztrátě účinnosti o cca 4 % a vzniká větší opotřebení ložisek z důvodu předpětí řemenu.

Nezbytnou součástí pohonu lineární osy je převod pohybu rotačního na pohyb lineární. Nejběžnějším řešením je použití kuličkových šroubů. Kuličkové šrouby se vyznačují především vysokou účinností (až 98%). Mají velkou tuhost, přesnost a trvanlivost.

4.2.1 Návrh převodů

Vzhledem k požadované přesnosti a konstrukčním možnostem byl zvolen převod kuličkovým šroubem. Přímo na kuličkový šroub je pomocí svěrné pružné spojky připojen motor a to bez použití převodovky. Díky tomuto řešení je možné docílit vysoké přesnosti a téměř nulových vůlí.

Kuličkové šrouby se vyrábějí s různým stoupáním, nejčastěji 5 nebo 10 mm/ot. Abychom dosáhli co nejvyšší síly a rozlišení, je žádán co nejvyšší převodový poměr. Byl proto zvolen kuličkový šroub se stoupáním 5 mm/ot. Pro dosažení žádané rychlosti posuvu $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ je zapotřebí rychlosti motoru 1200 ot/min.

4.2.2 Výpočet hnacího krouticího momentu

Žádaný krouticí moment motoru je vypočten dle následujícího vztahu :

$$M = \frac{F \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{424 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,88} = 0,383 \text{ Nm} \quad (2)$$

M - hnací krouticí moment [Nm]

F - axiální síla působící na matici [N]

P - stoupání kuličkového závitu [m]

η - účinnost (standardně 0,88)

4.2.3 Volba motorů

Hlavním parametrem při výběru motoru je vypočtený krouticí moment 0,383 Nm a rychlost 1200 ot/min. Dále je kladen požadavek na dynamiku a také na kvalitu.

Motory pro pohon našeho stroje byly vybrány z široké nabídky firmy Maxon [10] z produktové řady RE50. Jedná se o stejnosměrné, vysoce kvalitní dynamické motory s tzv. „ironless“ (bezjádrovým) rotorem. Rotor není tvořen železnou kostrou jako u běžných motorů, ale patentovanou technologií vinutí, které rotuje kolem neodymového magnetu. Důsledkem této technologie je vysoký točivý moment a výrazné zrychlení. Motor typu RE50 je vyráběn ve čtyřech variantách s různými typy vinutí. Jmenovitý moment může být až 0,38 Nm a nominální rychlost 2800 až 5700 ot/min. Rychlost je nepřímě úměrná momentu. Protože důležitějším parametrem je krouticí moment, byla zvolena varianta motoru s největším jmenovitým krouticím momentem. Motor RE50 370357 má nominální krouticí moment 380 Nm a nominální rychlost 2545 ot/min.

Tento motor přesně vyhovuje našim požadavkům. V následující tabulce je přehled důležitých parametrů zvoleného motoru.

Tabulka 4.1 parametry motoru RE50 370357

jmenovitý moment [mNm]	380
statický moment [mNm]	4091
rychlost naprázdno [ot/min]	2806
jmenovitá rychlost [ot/min]	2545
proud naprázdno [mA]	35
jmenovitý proud [A]	1,63
rozběhový proud [A]	17
jmenovité napětí [V]	70
setrvačnost rotoru [kg.m ²]	58,4 .10 ⁻⁶
hmotnost motoru [kg]	1,1



Obr. 4.1 Maxon RE50 [10]

4.2.4 Volba snímačů polohy

Abychom měli kontrolu nad polohou os a mohli řídit pohyb zpětnovazebním regulátorem, je nezbytné použít snímače polohy. Polohu lze snímat lineárním snímačem přímo na pojezdu nebo rotačním snímačem na ose motoru. Vzhledem k tomu, že pro převod pohybu rotačního na lineární jsou použity přesné kuličkové šrouby s předepjatými maticemi, poloha motoru by tak měla být konzistentní s lineární pozicí osy. Je proto vhodné použít snímače rotační a to i z ekonomického hlediska.

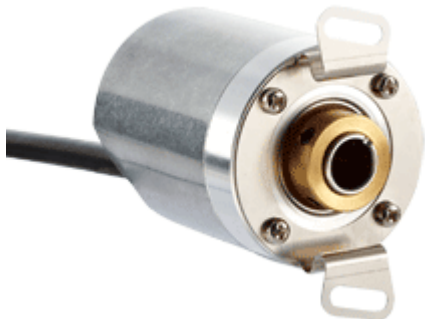
Pro snímání polohy motorů se nejběžněji používají dva typy snímačů. Inkrementální rotační snímače (IRC) nebo indukční resolvery. Základem resolveru jsou dvě navzájem kolmé cívky statoru a střídavě napájená otočná cívka na rotoru. Výstupem jsou dva signály se sinusovými průběhy napětí, které jsou fázově posunuté o 90°. Resolvery

neobsahují polovodičové prvky a jsou tak odolné vůči účinkům záření a vhodné do průmyslového prostředí.

Inkrementální rotační snímače polohy generují určitý počet impulzů za otáčku a tím určují samotné rozlišení pohonu. Rychlost pohybu je dána počtem impulzů za danou dobu. Je zřejmé, že z hlediska přesnosti a spolehlivosti je vhodnější použití resolveru. Vzhledem k tomu, že modul pro řízení motorů má pouze digitální vstupy určené pro IRC, nelze resolvery použít.

Pro snímání poloh motorů byly vybrány inkrementální snímače firmy SICK [11]. Zvolený typ snímačů má rozlišení 1000 impulzů na jednu otáčku. S uvažováním kuličkového šroubu se stoupáním 5 mm/ot získáme rozlišení lineárního posuvu 0,005 mm.

Nezbytnou součástí každé osy jsou také koncové a referenční snímače. Pro tyto účely se používají indukční, kapacitní nebo mechanické spínače. Z ekonomických důvodů byly vybrány běžné mechanické mikropsínače. Cena tohoto řešení je téměř stonásobně nižší ve srovnání s cenami speciálních průmyslových spínačů.



Obr. 4.2 IRC Snímač SICK DBS35 [11]



Obr. 4.3 Koncový mikropsínač

4.3 Určení výsledných parametrů pohonů

Parametry pohonů byly vypočítány především na základě požadovaných sil posuvů. Při fyzické realizaci zařízení však byly použity komponenty, jejichž parametry přesně neodpovídají vypočteným hodnotám. V této části kapitoly jsou proto provedeny výpočty výsledných parametrů, a to na základě skutečně použitých komponentů.

Krouticí moment použitých motorů odpovídá navržené hodnotě. Pro převod rotačního pohybu na pohyb lineární byly navrženy kuličkové šrouby se stoupáním 5 mm.ot⁻¹. Šroub s tímto stoupáním byl použit pouze u pohonu osy X. Při poptávce lineárních jednotek pro osy Y a Z nebyl údaj o stoupání šroubu konkrétně specifikován. Na

nabídce bylo uvedeno stoupání $10 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, ale při kontrole byl tento údaj přehlédnut. Firma tak dodala lineární jednotky s kuličkovými šrouby se stoupáním $10 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Toto řešení není úplně příznivé z hlediska přesnosti a síly. Sice bude možné dosáhnout dvojnásobné rychlosti oproti navržené, ale o polovinu se sníží rozlišení a síla. Vzhledem k tomu, že velikost síly posuvu 424 N , kterou požadujeme pro daný typ obrábění, je dostatečně naddimenzovaná (2,5 násobně), bude i poloviční síla pro toto obrábění dostatečná.

Hodnoty parametrů použitých komponent potřebné pro výpočty výsledných parametrů pohonů jsou uvedeny v následující tabulce. Tyto hodnoty byly získány z katalogových listů a vypočítány dle vztahů daných výrobcem.

Tabulka 4.2 Parametry použitých komponent

	osa X	osa Y	osa Z
hmotnost lineární jednotky [kg]	16	7,8	3,4
celková hmotnost mechanismu [kg]	33,9	13,4	4,5
moment setrvačnosti kul. šroubu [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$
celk. moment setrvačnosti rot. částí [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	$8,8 \cdot 10^{-5}$	$14,4 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
stoupání kul.šroubu [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$]	5	10	10
maximální rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,185	0,5	0,5

4.3.1 Výpočet sil lineárních posuvů

Výpočet sil posuvů vychází ze vztahu (1), kde se na základě žádané síly vypočte potřebný krouticí moment. V tomto případě je dosazen skutečný moment použitého motoru a vypočtena síla posuvu.

$$F_x = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \eta}{P_x} = \frac{0,38 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,88}{0,005} = 420 \text{ N} \quad (3)$$

$$F_{Y,Z} = \frac{M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \eta}{P_{YZ}} = \frac{0,38 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,88}{0,01} = 210 \text{ N} \quad (4)$$

Kde:

$M[\text{Nm}]$ - krouticí moment motoru

η - účinnost kuličkového šroubu

$P[\text{m}]$ – stoupání kuličkového šroubu

4.3.2 Výpočet rozlišení

Rozlišení lineárního posuvu závisí na stoupání kuličkového šroubu a na rozlišení rotačního snímače motoru. V důsledku použitých kuličkových šroubů s různým stoupáním se u tohoto stroje rozlišení v jednotlivých osách liší. Rotační snímače s rozlišením 1000 imp.ot^{-1} jsou použity pro všechny tři osy stejné.

$$r_X = \frac{P_X}{r_{IRC}} = \frac{5}{1000} = 0,005 \text{ mm} \quad (5)$$

$$r_{YZ} = \frac{P_{YZ}}{r_{IRC}} = \frac{10}{1000} = 0,01 \text{ mm} \quad (6)$$

Kde:

$r[\text{mm}]$ - rozlišení posuvu

$r_{IRC}[\text{imp.ot}^{-1}]$ – rozlišení snímače

$P[\text{mm}]$ – stoupání kuličkového šroubu

4.3.3 Určení maximálních povolených rychlostí posuvů

Motory, které jsou ve všech třech osách stejné, mají jmenovitou rychlost 2545 ot.min^{-1} . Použitý řídicí systém umožňuje vyhodnocovat v přepočtu až 3000 ot.min^{-1} . Z hlediska řízení je tedy možné využít plný otáčkový rozsah motoru. Pokud uvažujeme jmenovité otáčky motoru 2545 ot.min^{-1} , při použití kuličkového šroubu se stoupáním 10 mm.ot^{-1} bude posuvná rychlost 424 mm.s^{-1} . Použité lineární jednotky pro osy Y a Z dovolují pohyb s rychlostí až 500 mm.s^{-1} . V tomto případě bude omezujícím prvkem samotný motor. Maximální rychlost na osách Y a Z tedy může být až 424 mm.s^{-1} .

U pohonu osy X je použit kuličkový šroub se stoupáním 5 mm.ot^{-1} , délkou 1 m a průměrem 12 mm. Při tomto stoupání a jmenovitých otáčkách motoru může být dosaženo posuvné rychlosti 212 mm.s^{-1} . Vzhledem k použité délce a průměru šroubu nelze dle výrobce provozovat takto vysoké otáčky. Dovolené otáčky při použitých rozměrech šroubu jsou 2220 ot.min^{-1} , což odpovídá rychlosti posuvu 185 mm.s^{-1} .

4.3.4 Výpočet maximálního zrychlení

Hodnota maximální akcelerace je důležitá při nastavování dynamiky pohonu. Tento parametr je nutné vypočítat a nastavit pro každou osu samostatně. Závisí především na celkové hmotnosti urychlované části konstrukce. Dále pak na momentu setrvačnosti kuličkového šroubu příslušného pohonu a v případě svislé osy také na statické

zatěžovací síle. Vzhledem k tomu, že tyto hodnoty jsou ve výsledku zanedbatelné, při výpočtu proto nebyly uvažovány. Výpočet vychází ze vztahu druhého Newtonova zákona ($F = m \cdot a$), kde je dosazena vypočtená síla pohonu a hmotnost urychlované části konstrukce.

Maximální zrychlení ve směru X:

Dáno: -síla pohonu osy X: $F_x=420\text{ N}$

-hmotnost mechanismu $m_x=33,9\text{ kg}$

$$a_x = \frac{F_x}{m_x} = \frac{420}{33,9} = 12,4\text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (7)$$

Maximální zrychlení ve směru Y:

Dáno: -síla pohonu osy Y: $F_y=210\text{ N}$

-hmotnost mechanismu $m_y=13,4\text{ kg}$

$$a_y = \frac{F_y}{m_y} = \frac{210}{13,4} = 15,6\text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (8)$$

Maximální zrychlení ve směru Z:

Dáno: -síla pohonu osy Z: $F_z=210\text{ N}$

-hmotnost mechanismu $m_z=4,5\text{ kg}$

$$a_z = \frac{F_z}{m_z} = \frac{210}{4,5} = 46,7\text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (9)$$

4.4 Přehled výsledných parametrů pohonů

V následující tabulce jsou shrnuty výsledné hodnoty výše vypočtených parametrů.

Tabulka 4.3 Výsledné parametry pohonů

	osa X	osa Y	osa Z	jednotky
síla posuvu	420	210	210	N
povolená rychlost posuvu	185	424	424	mm.s ⁻¹
maximální zrychlení	12,4	15,6	46,7	m.s ⁻²
rozlišení	0,005	0,01	0,01	mm

Vybrané pohony vyhovují zadaným parametrům. Ve srovnání s komerčním strojem Comagrav Mistral 900 bylo dosaženo relativně dobrých výsledků. Některé parametry jsou i podstatně lepší.

5 Řídicí systém CNC

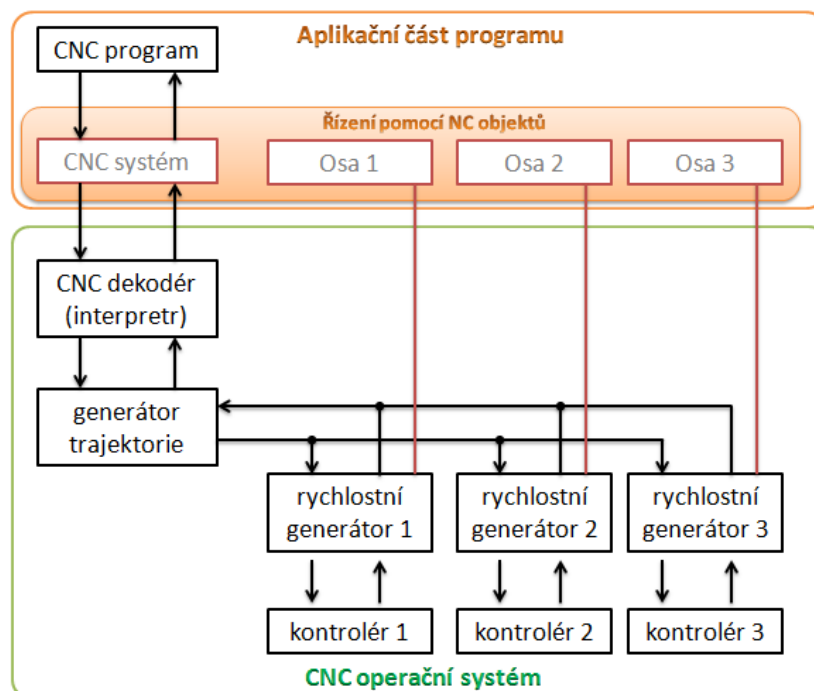
Pojem CNC (Computer Numeric Control) se vztahuje k velké skupině strojů, které pro současný pohyb několika os používají počítačové řízení. Na rozdíl od řízení vaček, které spočívá v závislosti jedné osy na druhé, kde jedna osa je master a druhá slave, u CNC jsou všechny osy řízené volně programovatelnou trajektorií. Tato trajektorie je popsána CNC programem. CNC program obsahuje informace o typu trajektorie, souřadnicích, rychlostech posuvů a dalších technologických parametrech. CNC systém danou trajektorii zpracuje a pomocí lineární nebo kruhové interpolace rozloží do pohybu jednotlivých os.

K řízení tohoto stroje byla použita technika B&R [12]. V následujících podkapitolách je popsán přístup k řízení CNC použitý u B&R, princip řízení, použitý hardware a elektrické zapojení komponentů. Vlastním programem pro řízení CNC systému se zabývá kapitola 6.

5.1 Softwarový koncept CNC řízení

B&R řeší řízení CNC jako Soft-PLC. To znamená, že CNC systém je implementován přímo do PLC jako program. Není proto potřeba žádný další hardware navíc, ale postačí běžný PLC automat z široké nabídky B&R.

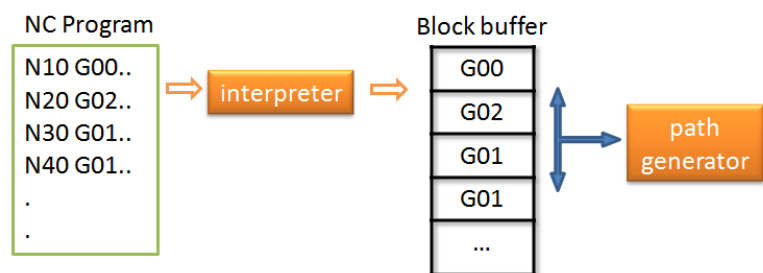
Software CNC systému B&R je v PLC založen na konceptu, který je zjednodušeně ilustrován na následujícím obrázku.



Obr. 5.1 Softwarový koncept

Softwarový koncept je rozdělen na dvě základní části - operační systém a aplikační část programu. V aplikačním programu je nadefinována obsluha jednotlivých os pomocí NC akcí (např. spouštění a aktivace osy, aktivace programu). Pomocí NC objektů lze také osy přímo nezávisle polohovat. Stejně tak lze pomocí NC objektů řídit i celý CNC systém.

CNC operační systém zajišťuje generování pohybů jednotlivých os. Základem je dekodér (nová verze dekodéru se nazývá interpret). Jeho funkce je znázorněna na obr. 5.2. Dekodér dekóduje NC program a jednotlivé bloky ukládá do vyrovnávací paměti pro tzv. „path generator“. Path generator se pohybuje po vyrovnávací paměti a generuje jednotlivým osám žádané polohy. Je možné se pohybovat dopředu i dozadu a tím umožnit zpětný chod po dané trajektorii. Dalším blokem je rychlostní generátor, který je zařazen před proudovým regulátorem. V našem systému je proudový regulátor a výkonový člen reprezentován modulem MM4456. Polohový generátor každé ose v čase postupně udává hodnotu pro polohový regulátor, resp. řídí rychlost, kterou má osa jet na dané místo.



Obr. 5.2 Dekodér a path generator.

5.2 Použitý hardware

V této kapitole je popsáno zařízení použité k řízení stroje. Základem systému je průmyslový počítač PowerPanel B&R. Dále jsou použity příslušné moduly B&R umožňující řízení motorů, snímání polohy os a spínání periferií. V poslední části této kapitoly jsou popsány zvolené napájecí zdroje.

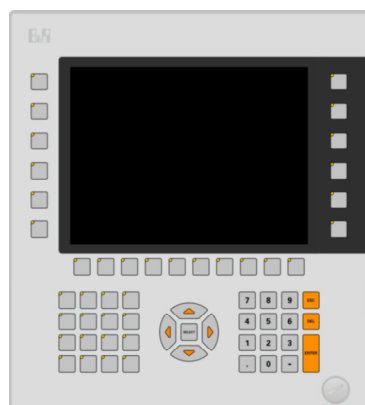
5.2.1 Průmyslový počítač

Pro řízení stroje byl vybrán Power Panel 5PP581. Jedná se o průmyslový počítač vybavený procesorem Intel® Atom™ Z530 1600/533 MHz a operační pamětí 1024 MB. Pro komunikaci počítače s periferiemi slouží komunikační interface s rozhraním Ethernet Powerlink. Dále je možná síťová komunikace, která probíhá přes Ethernet TCP/IP. K ovládání slouží barevný 10,4“ dotykový displej a množství funkčních tlačítek.

Do tohoto průmyslového počítače lze nahrát libovolný operační systém. Pro funkci PLC a vykonávání řídicích programů je zapotřebí operační systém Automation Runtime. Ten pracuje jako nastavitelný, deterministický, víceúlohový systém reálného času.

Tabulka 5.1 Technické údaje průmyslového počítače

typ	5PP581.1043-00
procesor	Z530 1600/533 MHz, 512 kB
operační paměť	DDR2 1024 MB
paměťové medium	CompactFlash 2 GB
porty	USB, RS-232, Ethernet
obrazovka	TFT 10,4“ FT IF
napájení	DC 24V



Obr. 5.3 PowerPanel 5PP581 [12]

5.2.2 Vstupně výstupní moduly

Samotný průmyslový počítač Power Panel 5PP581 není přímo vybaven žádnými digitálními či analogovými vstupy a výstupy pro řízení technologií. Je nutné připojit vzdálené externí vstupně výstupní zařízení. B&R nabízí celou řadu různých řešení. Nejběžněji je používán flexibilní systém modulů X20. Tato série zahrnuje celou řadu různých univerzálních modulů pro instalaci na DIN lištu. Komunikaci mezi jednotlivými moduly zajišťuje vysokorychlostní sběrnice X2X link. Moduly lze libovolně kombinovat a přizpůsobit tak systém každému stroji. V našem případě byly použity tyto moduly: X20BC0083, X20PS9402, X20MM4456, X20DI9371, X20AI2622, X20DO4331.

X20BC0083 je modul, který umožňuje komunikaci mezi sběrnici X2X link a Ethernet Powerlink. Modul je vybaven dvěma komunikačními porty s konektory RJ-45 pro připojení na sběrnici Ethernet Powerlink. Každé zařízení na této sběrnici musí mít nastavené specifické číslo. Toto číslo se nastavuje na horním panelu pomocí dvou otočných přepínačů v šestnáctkové číselné soustavě. Připojení na sběrnici X2X link je umístěno na pravém boku modulu.

X20PS9402 slouží k napájení všech zařízení umístěných na sběrnici X2X link. K připojení napájení je určeno posledních 6 svorek na připojovacím konektoru modulu. Napájecí napětí je 24 V DC.

X20MM4456 je výkonový modul který umožňuje řízení čtyř stejnosměrných motorů. Obsahuje 4 kanály s plnými H můstky řízené pomocí pulzně šířkové modulace. Jmenovité napájecí napětí může být 24 až 48 V DC. Jmenovitý proud pro každý kanál

může být až 6 A. Modul je dále vybaven 16 digitálními vstupy, které jsou určeny k připojení inkrementálních snímačů motorů. Maximální frekvence vstupních impulzů je 50 kHz. V této hodnotě spočívá jisté omezení pohonu. Při použití inkrementálních snímačů s rozlišením 1000 impulzů na otáčku, frekvenci 50 kHz odpovídá rychlost motoru 3000 ot/min. Je nutné správně nastavit omezení, aby nedošlo k překročení této frekvence. Pokud by byla frekvence překročena, došlo by ke zkreslení informace o rychlosti i poloze motoru.

Modul má zabudovanou pouze proudovou zpětnou vazbu. Rychlostní a polohová zpětná vazba může být externě vytvořena v nadřazeném řídicím systému. Pro ovládání modulu může být použita knihovna PLCopen, a to díky možnosti použití rozhraní SDC.



Obr. 5.4 Modul X20MM4456 [12]

X20DI9371 obsahuje 12 digitálních vstupů pro jednovodičové připojení. Log“1“ > +15 VDC, log“0“ < 5 VDC. Vstupy jsou vybaveny hardwarovými filtry pro pulzy $\leq 100\mu\text{s}$ a konfigurovatelnými softwarovými filtry s nastavením od 0 do 25 ms.

X20AI2622 je modul se dvěma napěťovými a proudovými vstupy s rozlišením 12 bitů. Napěťové vstupy mají rozsah $\pm 10\text{ V}$, proudové 0 až 20 mA, nebo 4 až 20 mA..

X20DO4331 obsahuje 4 digitální výstupy s třívodičovým zapojením. Každý výstup vyžaduje samostatné připojení napájení 24 VDC. Proud na každém výstupu může být až 2 A.

5.2.3 Napájení

V celém stroji jsou vyžadována dvě různá napájecí napětí. Pro napájení průmyslového počítače, systému modulů a všech senzorů je zapotřebí napětí 24 VDC. Celkový proud při zapojení všech zařízení by neměl přesáhnout 1,5A. Pro toto napájení byl použit

modulový zdroj STEP-PS Phoenix Contact [13]. Zdroj je určen k osazení na nosnou DIN lištu. Výstupní napětí je 24 V DC a výstupní proud 1,75 A.

Napájení výkonového modulu, který řídí motory, vyžaduje napětí až 48V. Proud na každý ze 4 kanálů může být až 6A. Při úvaze, že jsou připojeny všechny 4 motory, může protékat celkový proud až 24 A. Pro tento účel byl použit velice výkonný spínaný zdroj QUINT-PS Phoenix Contact. Jmenovité vstupní napětí je 3×-400 V AC, jmenovité výstupní napětí 48 V DC a výstupní proud 20 A. Zdroj má obvod pro omezení proudu a jeho signalizaci, kterou lze připojit do PLC systému a reagovat tak na případné nežádoucí provozní stavy.



Obr. 5.5 Napájecí zdroje Phoenix Contact [13]

5.3 Zapojení komponentů

Základem systému je průmyslový počítač Power Panel 5PP581 a sestava modulů řady X20.

Přenos dat mezi zařízeními je zprostředkován pomocí realtime komunikace Ethernet Powerlink.

Prvním členem modulárního systému je modul X20BC083 umožňující komunikaci sběrnice Ethernet Powerlink se sběrnici X2X link, která je použita pro komunikaci mezi jednotlivými moduly.

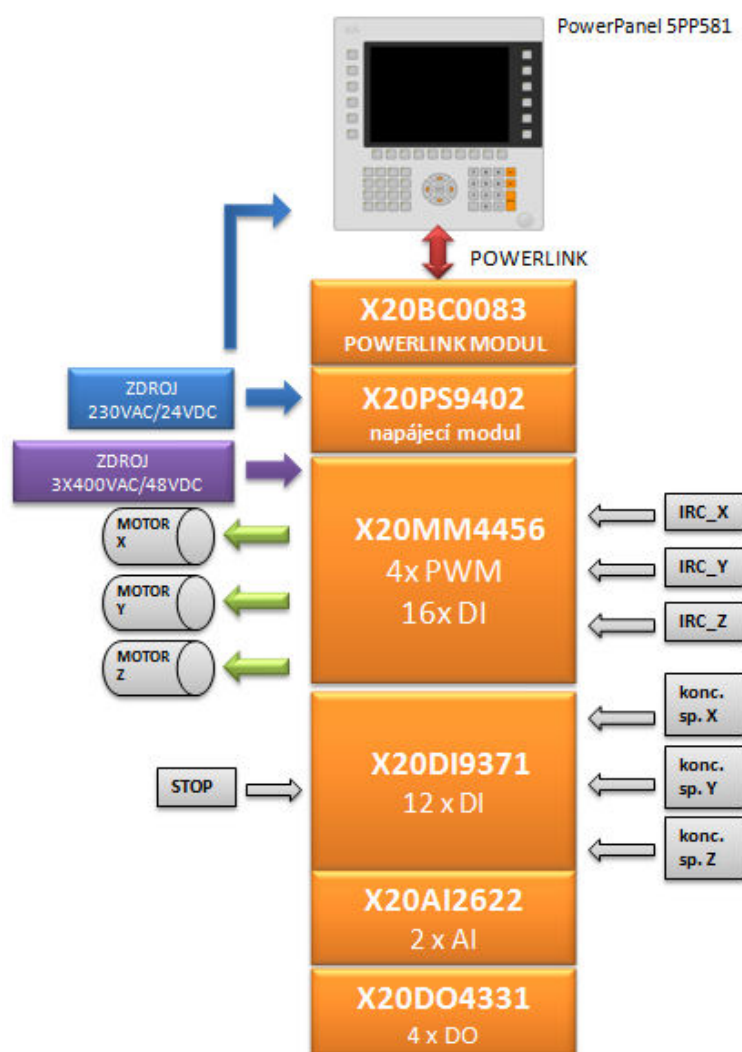
Nezbytnou součástí systému je modul X20PS9402, který slouží k napájení sběrnice X2X link. Dalším členem je modul X20MM4456 vybavený čtyřmi PWM kanály, které řídí všechny tři motory. Čtvrtý kanál je určen pro obráběcí vřeteno, které může být

řešeno stejnosměrným motorem. Modul dále obsahuje celkem 16 digitálních vstupů, které jsou určeny pro IRC snímače polohy motorů.

Pro připojení všech koncových snímačů a dalších ovládacích prvků slouží modul X20DI9371, který je vybaven 12 digitálními vstupy. 10 vstupů je využito pro koncové spínače a tlačítko „stop“. Další dva digitální vstupy jsou k dispozici pro budoucí rozšíření.

Do systému jsou navíc zařazeny moduly X20DO4331 a X20AI2622. V momentální konfiguraci stroje nejsou tyto moduly využity, ale je počítáno s jejich využitím v budoucích aplikacích.

Schéma zapojení komponentů je blokově znázorněno na následujícím obrázku. Kompletní dokumentace k elektrickému zapojení celého systému je součástí přílohy.



Obr. 5.6 Blokové schéma zapojení

6 Implementace CNC pomocí ARNC0

K vytvoření programu pro řídicí systém bylo použito vývojové prostředí Automation Studio. K dispozici byl projekt s vytvořenými SDC osami a vyřešeným stavovým automatem pro obsluhu os. Na tento projekt bylo navázáno a doplněno CNC řízení. V následujících podkapitolách je popsán princip, postup vytvoření CNC systému a program pro jeho ovládání.

6.1 Knihovna ARNC0

Klíčovou částí pro funkci CNC v zařízení B&R je knihovna ARNC0. Tato knihovna poskytuje datové typy a funkce pro CNC a polohování os. Umožňuje následné provádění koordinovaných pohybů pomocí interpolací. Pohyby jsou definovány v CNC programu ve formě G-kódů.

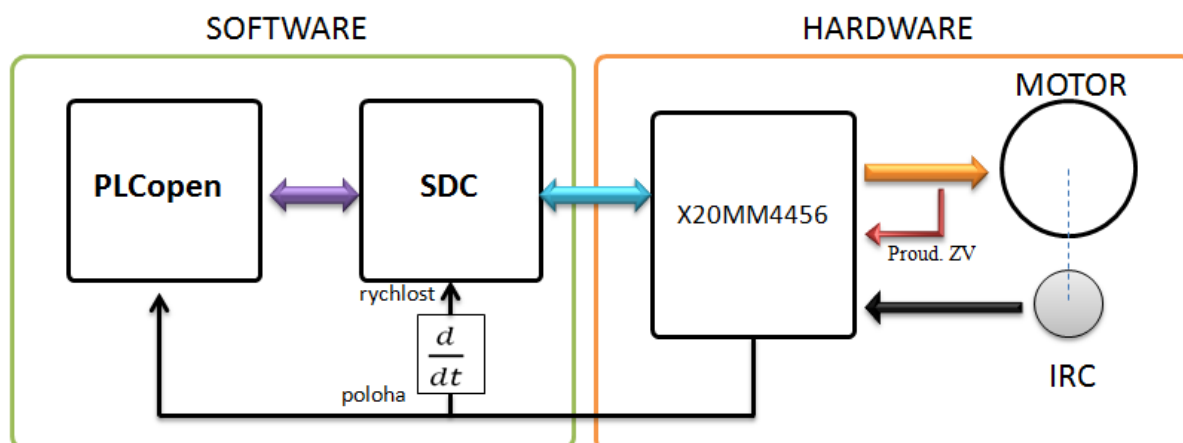
6.2 Vytvoření CNC systému

Jak bylo výše zmíněno, CNC systém je v PLC implementován jako program. Softwarový koncept řízení je rozdělen na dvě navzájem propojené části. Aplikační část programu a CNC operační systém. Tyto části je třeba vložit do projektu a správně nakonfigurovat. CNC operační systém, který je již hotovou součástí Automation Studia, stačí pouze správně nastavit. Aplikační část je nutné naprogramovat.

Základním postupem při vytvoření CNC systému jsou tyto kroky: vložení os, vložení CNC, přiřazení os k CNC.

6.2.1 Vložení os

Vkládání os se provádí pomocí průvodce vytvořením nové osy, kde se vybere volba, že osa využívá PLCopen a je typu CNC. Tento postup se provádí, pokud používáme servozesilovače ACOPOS. V našem případě je ale použit modul X20MM4456, který přímo neumožňuje řízení pomocí PLCopen. Musí být proto nejprve vytvořena softwarová struktura SDC, která umožňuje řízení pohybu pomocí funkcí PLCopen. Princip SDC je znázorněn na obrázku 6.1. Softwarové ovládání os pomocí PLCopen bylo po vzájemné dohodě převzato z bakalářské práce Martina Vojíře [8]. Definici SDC os včetně rychlostního regulátoru implementoval do projektu vedoucí této práce.



Obr. 6.1 Princip SDC

6.2.2 Vložení CNC

Aby byla umožněna funkce CNC, je třeba do projektu vložit bezpečnostní klíč s ARNC0. Vložení se provede v kořenové struktuře PLC v položce označené zámkem. Následným dvojklikem na vytvořený klíč ARNC0 se otevře mapovací tabulka. V tabulce lze nastavit až 8 CNC systémů (kanálů), které je možné provozovat najednou a nezávisle na sobě. Využijeme pouze první kanál, který libovolně pojmenujeme. Dále v „NC INIT Parameter“ libovolně pojmenujeme CNC objekt (např. „myCNC“).

Model no.	NC Object Name	Nc Object Type	Channel	Simulation	NC INIT Parameter
PLC1	ST1.CNC1	ncCNC SYS	1	Off	myCNC
5PP581.1043-00	ST1.CNC2	ncCNC SYS	2	Off	
5PP5CP.US15-02	ST1.CNC3	ncCNC SYS	3	Off	
5PP5IF.FPLM-00	ST1.CNC4	ncCNC SYS	4	Off	
1A4603.00-2	ST1.CNC5	ncCNC SYS	5	Off	
ARNC0	ST1.CNC6	ncCNC SYS	6	Off	
VNC-Viewer-VGA	ST1.CNC7	ncCNC SYS	7	Off	
X20BC0083	ST1.CNC8	ncCNC SYS	8	Off	
X20PS9402					
X20MM4456					
X20DI9371					
X20AI2622					
X20DO4331					

Obr. 6.2 Nastavení mapovací tabulky

Po vložení CNC systému je ještě nutné provést náležitě úpravy v nastavení. Vzorkovací perioda musí být nastavena minimálně na 4 ms s nulovou tolerancí. Toto nastavení se provede v konfiguraci cyklické třídy, do které je CNC systém přiřazen. Přiřazení do cyklické třídy je definováno v záložce „Configuration View“ v souboru „Arnc0cfg.ncc“, který je umístěn ve složce „Motion“.

6.2.3 Přiřazení os k CNC

Nyní je zapotřebí přiřadit osy, které mají být ovlivněny CNC systémem. Přiřazení os, nastavení limitů, přiřazení snímačů polohy a další nastavení se provádí v tabulce parametrů vytvořeného CNC systému. Tabulka je umístěna pod názvem „myCNC.cns“ v záložce „Logical View“. Každému CNC kanálu lze přiřadit až 15 os. Přiřazovanou osu vybereme v položce „nc_object_name“ a v následujícím políčku osu libovolně pojmenujeme. Nastavení je patrné z obrázku 6.2, kde je zvolena virtuální osa „gvAxis01i“ a pojmenována jako „X“. Stejné nastavení se provede i pro další osy Y a Z.

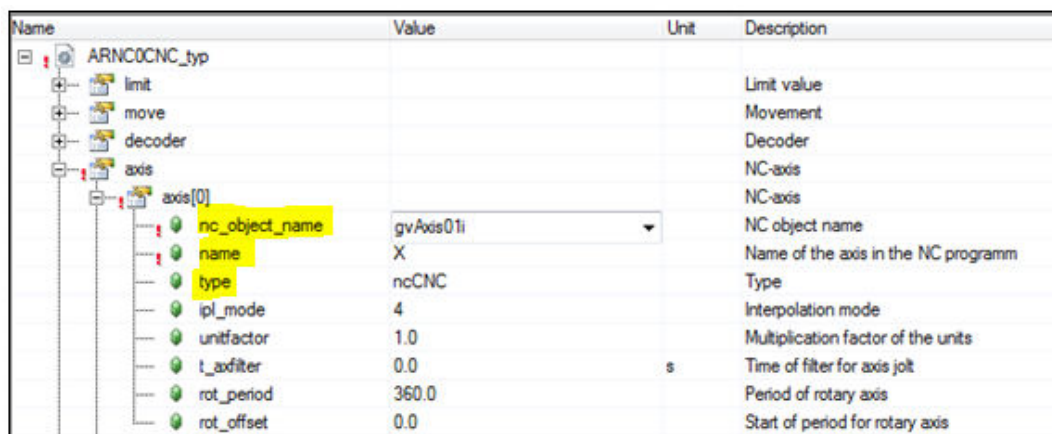
Každá osa musí mít nastaveno, jakého je typu. Výběr typu osy se provede v parametru „type“ (třetí zvýrazněný řádek na Obr. 6.3 Přiřazení os k CNC). Systém umožňuje řídit různé typy os. Na výběr jsou tyto základní typy: ncCNC, ncLINEAR, ncTANGENT, ncROTARY.

ncCNC je osa kartézského souřadného systému. Tento typ je použit pro všechny tři osy v našem systému.

ncLINEAR slouží jako další (pomocná) lineární osa, která ale není interpolována spolu s hlavními osami. Používá se například pro pohyby nástrojů, posouvání obrobku, atp.

ncTANGENT je automatická tangenciální osa, která se natáčí podle směru trajektorie. Používá se většinou pro oscilační nůž, který při řezání musí udržovat natočení ve směru řezu. Funkce automatické tangenciální osy je možné v NC programu aktivovat pomocí kódu G140 a deaktivovat kódem G141.

ncROTARY je typ osy, která se používá jako rotační. Většinou se používá pro natáčení obrobku, kde je uvažováno, že rovina je nabalena na povrch válce.



Name	Value	Unit	Description
ARNC0CNC_type			
limit			Limit value
move			Movement
decoder			Decoder
axis			NC-axis
axis[0]			NC-axis
nc_object_name	gvAxis01i		NC object name
name	X		Name of the axis in the NC programm
type	ncCNC		Type
ipl_mode	4		Interpolation mode
unitfactor	1.0		Multiplication factor of the units
t_adfilter	0.0	s	Time of filter for axis jolt
rot_period	360.0		Period of rotary axis
rot_offset	0.0		Start of period for rotary axis

Obr. 6.3 Přiřazení os k CNC

6.2.4 Program ovládání

Před spuštěním CNC programu je zapotřebí inicializovat a zreferovat všechny osy. Tuto proceduru již obsahuje projekt, na který bylo navázáno. Další potřebné procedury pro ovládání CNC jsou součástí této práce.

Program umožňující ovládání stroje byl v projektu umístěn ve složce „CNC“ pod názvem „cncCtrl.st“. Program řeší základní procedury k ovládání stroje.

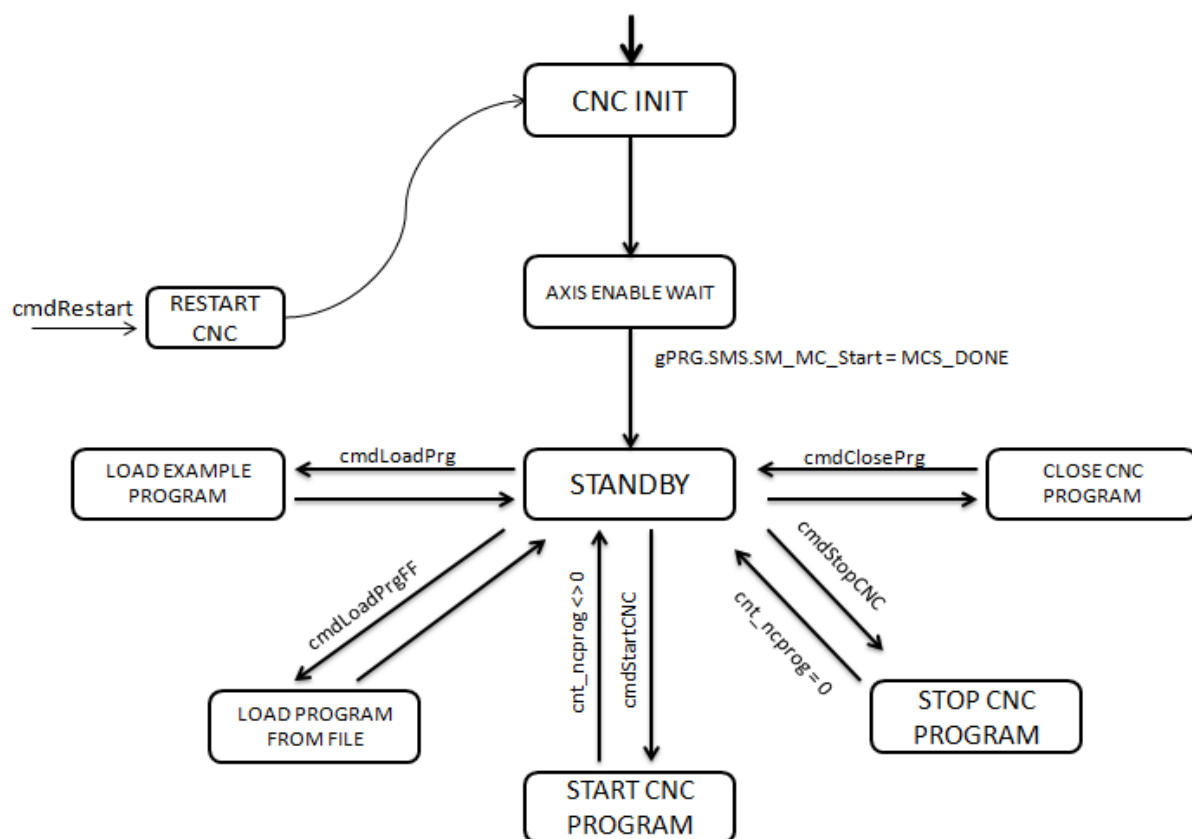
Po spuštění systému je inicializováno CNC jádro a následuje čekání na inicializaci všech os. Pokud jsou všechny osy připraveny, nastane stav „standby“, kdy se čeká na další příkazy jako je spuštění programu, zastavení programu, reset systému, atp.

Nezbytným krokem před spuštěním pohybu stroje je načtení CNC programu. Načtení je možné provést pouze ze stavu „standby“. Program lze načíst ze souboru, který je uložen na disku řídicího počítače. Je také možné spustit některý ukázkový program, který je uložen přímo v datovém objektu, který je v operační paměti PLC..

Cyklus obrábění se spouští pomocí příkazu „cmdStartCNC“ nastavením na hodnotu TRUE. Když je program spuštěn, následuje opět stav „Standby“, ze kterého je možné probíhající cyklus manuálně zastavit pomocí příkazu „cmdStopCNC“. Všechny tyto příkazy se nastavují pomocí HMI rozhraní, které je řešeno v bakalářské práci Jana Šotka. Přehled příkazů pro ovládání přes HMI je uveden v tabulce 6.1. Ovládání je znázorněno stavovým diagramem na obrázku 6.4.

Tabulka 6.1 Přehled příkazů pro ovládání CNC

proměnná	dat. typ	význam	komponenta, název
cmdRestart	BOOL	restart CNC systému	tlačítko „RESTART“
cmdLoadPrg	BOOL	načtení ukázkového	tlačítko „EXAMPLE PRG“
cmdLoadPrgFF	BOOL	načtení programu ze	tlačítko „LOAD FROM FILE“
cmdClosePrg	BOOL	odebrání programu	tlačítko „CLOSE“
cmdStartCNC	BOOL	spuštění obráběcího cyklu	tlačítko „CYCLE START“
cmdStopCNC	BOOL	zastavení obráběcího cyklu	tlačítko „CYCLE STOP“
cncReady	BOOL	signalizace-stav „standby“	kontrolka „CNC READY“
cycleRun	BOOL	signal.-spuštěný cyklus	kontrolka „CYCLE“
sInIt	enSM_CNCctr	info. o aktuálním stavu	stavový řádek



Obr. 6.4 Stavový diagram pro základní řízení CNC

7 Přehled dosažených výsledků a technických parametrů

V práci bylo dosaženo těchto výsledků:

- 1) navrženo základní uspořádání mechanické konstrukce
- 2) navržen a zkonstruován řídicí rozvaděč
- 3) osazení technikou B&R
- 4) vytvoření elektrotechnické dokumentace
- 5) návrh a dimenzování pohonů
- 6) montáž pohonů a zapojení elektroinstalace
- 7) výpočty technických parametrů
- 8) softwarová implementace CNC řídicího systému

Technické parametry:

vnější rozměry stroje	90 x 93 x 137 cm (š × v × d)
vnější rozměry rozvaděče	39 x 30 x 46,5 cm (š × v × h)
hmotnost stroje	83 kg
hmotnost rozvaděče	20 kg
pracovní prostor	765 × 387 × 142 mm (X × Y × Z)
rozlišení	0,01 mm
maximální povolená rychlost	200 mm.s ⁻¹
maximální povolené zrychlení	2000 mm.s ⁻²

8 Závěr

Výsledkem této práce je realizované funkční CNC zařízení, které splňuje všechny stanovené požadavky. Bylo navrženo základní uspořádání mechanické konstrukce, kterou dále podrobně vyřešil Jan Šotek ve své bakalářské práci. Dále byla navržena a realizována veškerá elektroinstalace. Ve vývojovém prostředí Automation Studio byl naprogramován CNC řídicí systém. Elektrotechnická dokumentace je v příloze č. 3. Programová část je na přiloženém CD.

Základní skelet stroje je sestaven z konstrukčních hliníkových profilů a je osazený průmyslově vyrobenými díly. Mechanická konstrukce je velice přesná a pro požadované účely dostatečně dimenzovaná. K pohonu jsou použity kvalitní dynamické motory značky Maxon. Z nabídkové řady stejnosměrných motorů byla vybrána nejvýkonnější verze. Díky vysokému výkonu motorů a jejich výborným dynamickým vlastnostem dosahuje stroj velice dobrých výsledků. K řízení je použita technika B&R. Stejnosměrné motory jsou řízeny modulem s výkonovými PWM kanály, které ovládá průmyslový počítač PowerPanel 5PP581. Do řídicího systému jsou připojeny navíc další moduly s analogovými i digitálními vstupy, které umožní v budoucnu provádět různá rozšíření, např. dovybavit stroj měřicí sondou, skenovacím zařízením, apod. Komunikace mezi řídicími moduly a počítačem je realizována pomocí moderní vysoce rychlostní komunikace reálného času Ethernet Powerlink. Samotný CNC systém, který zpracovává vložený obráběcí program a provádí interpolaci jednotlivých os je implementován v řídicím počítači jako program. Systém obsahuje všechny základní funkce potřebné pro jednoduchý provoz. Pomocí tlačítek a dotykového displeje řídicího počítače lze načíst NC program a spustit pohyb stroje. Stroj může být ovládán přímo z panelu vybaveného dotykovým displejem a několika funkčními tlačítky nebo pomocí vzdáleného přístupu přes internet.

Zařízení má velice široké využití. K dispozici je navíc jeden výkonový PWM kanál, na který lze připojit například obráběcí vřeteno realizované stejnosměrným motorem nebo další osu. K dispozici je dále 16 digitálních výstupů, které mohou ovládat další periferie. Na konstrukci lze snadno připevnit přídatná zařízení jako je oscilační nůž, nebo tavná hlavice pro 3D tisk. Stroj je tedy možné využít například jako plotter, 3D tiskárnu nebo frézku.

Zařízení také přinese výhody pro studenty, kteří se zabývají automatizační technikou B&R. Na tomto stroji si mohou reálně testovat své vytvořené aplikace pro řízení pohonů.

Zařízení je tedy kompletní a funkční celek. Disponuje však pouze těmi nejzákladnějšími funkcemi. Nyní je třeba rozpracovat možnosti CNC systému, které B&R nabízí. To může být předmětem navazujících prací dalších studentů. Problematika je velmi široká a zajímavá.

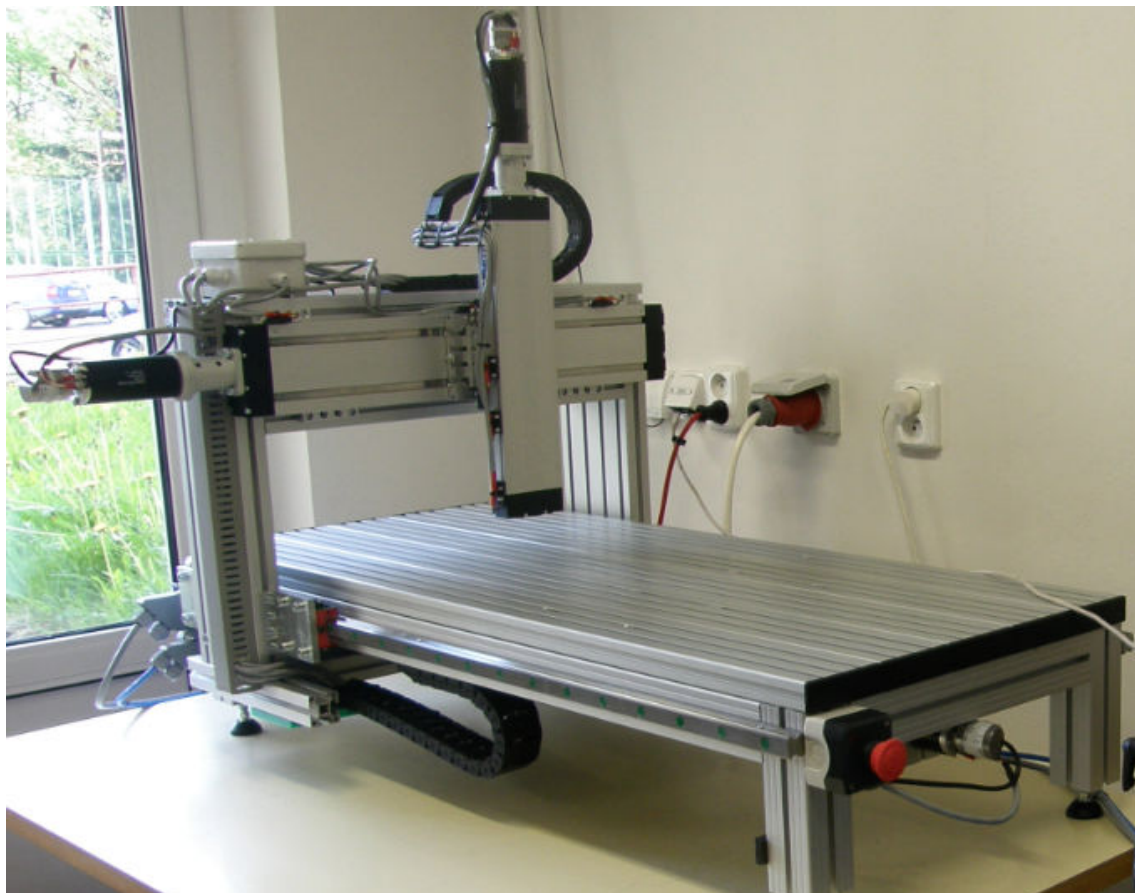
Literatura

- [1] ŠTULPA, Miroslav. *CNC obráběcí stroje a jejich programování*. 1. Praha : BEN , 2006. 126 s. ISBN 80-7300-207-8.
- [2] KRÁL, Pavel; ŠRAJER, Jan. *CNC obráběcí centra*. 1. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2008. 79 s. ISBN 978-80-7375-163-0.
- [3] COMAGRAV: *3D CNC frézky*. [online]. [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: http://www.comagrav.com/cz/gravirovaci_frezovaci_stroje_mistral.html
- [4] Siemens: *Řídicí systémy pro obráběcí stroje*. [online]. [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: <http://stest1.etnetera.cz/ad/current/index.php?ctxnh=3c76394997&ctxp=home>
- [5] KURKA, Jiří. Řídicí systémy, pohony a motory pro obrábění stroje společnosti Siemens. *Automatizace: Odborný časopis pro automatizaci, měření a inženýrskou informatiku*. 2005, roč. 48, č. 12, s. 3. Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=984>
- [6] HEIDENHAIN: *Řízení obráběcích strojů*. [online]. [cit. 2013-02-28]. Dostupné z: http://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty-a-pouziti/rizeni-obrabecich-stroju/
- [7] ČSN ISO 841. *Systémy průmyslové automatizace a integrace – Číslicové řízení strojů – Souřadnicový systém a terminologie pohybu*. Druhé vydání. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [8] VOJÍŘ, Martin. *Kartézský polohovací systém plazmového hořáku*. Liberec, 2012. Bakalářská práce. TUL. Vedoucí práce Leoš Beran.
- [9] DELCAM. *FeatureCAM: Easy-to-use CAM software for milling machines, turning and turn/mill centres, and wire EDMs* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.featurecam.com/>
- [10] MAXON. *Maxon motor* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/index>

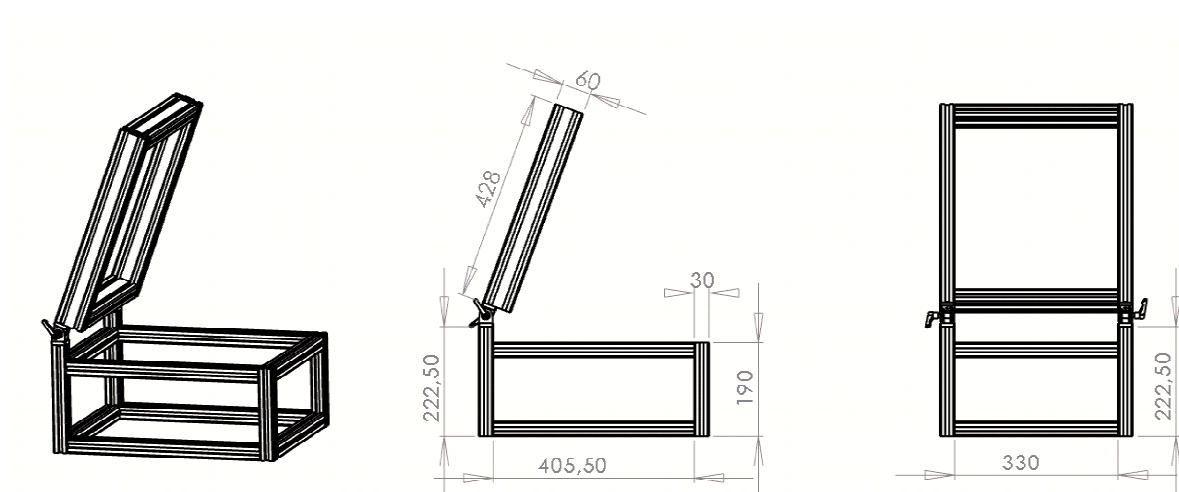
- [11] SICK. *Sick: Sensor intelligence* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z:
http://www.sick.com/group/EN/home/products/product_news/encoders/Pages/DBSxxE_incremental_encoder.aspx
- [12] B&R. *B&R automatizace* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z:
<http://www.br-automation.com/cs/>
- [13] PHOENIX CONTACT. *Převodníky a oddělovače* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z:
<http://eshop.phoenixcontact.cz/phoenix/treeViewClick.do?reloadFrame=true&UID=2868648&parentUID=852648329>

Přílohy

Příloha č. 1 - Osazený stroj



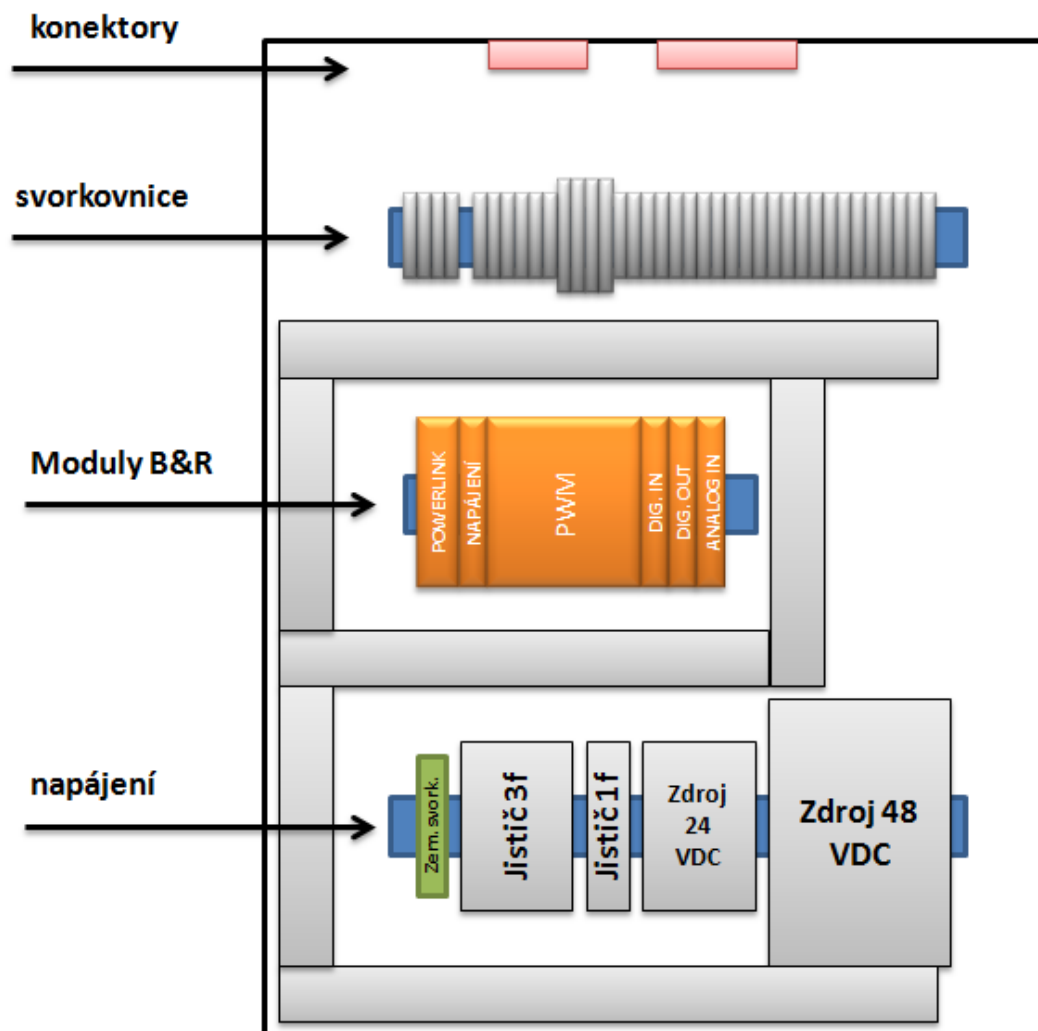
Příloha č. 2 - Výrobní dokumentace řídicího rozvaděče



seznam materiálu:

Položka	Typové číslo	Délka [mm]	Počet [ks]	poznámka
Profil 30x60, 6F, P	1.11.030060.65P	428	2	vrtání pro konektor - na jednom konci (přichycení kloubu)
Profil 30x60, 6F, P	1.11.030060.65P	330	2	vrtání pro konektor - oba konce
Profil 30x30, 4F, P	1.11.030030.43P	330	4	vrtání pro konektor - oba konce
Profil 30x30, 4F, P	1.11.030030.43P	405,5	4	vrtání pro konektor - oba konce
Profil 30x30, 4F, P	1.11.030030.43P	190	2	bez vrtání
Profil 30x30, 4F, P	1.11.030030.43P	222,5	2	vrtání pro konektor - na jednom konci (přichycení kloubu)
kloub Zn 30x30s				
pákou	1.63.52030030	-	2	
konektor, universal	1.21.3F0	-	24	
konektor pro kloub		-	4	(konektor pro přichycení kloubu z čela profilu 30x30)
Přichytka F, M4	1.64.2F2M4.2	-	28	
Krytka 30x60, černá	1.42.20306.2	-	2	
Krytka 30x30, černá	1.42.20303.2	-	6	

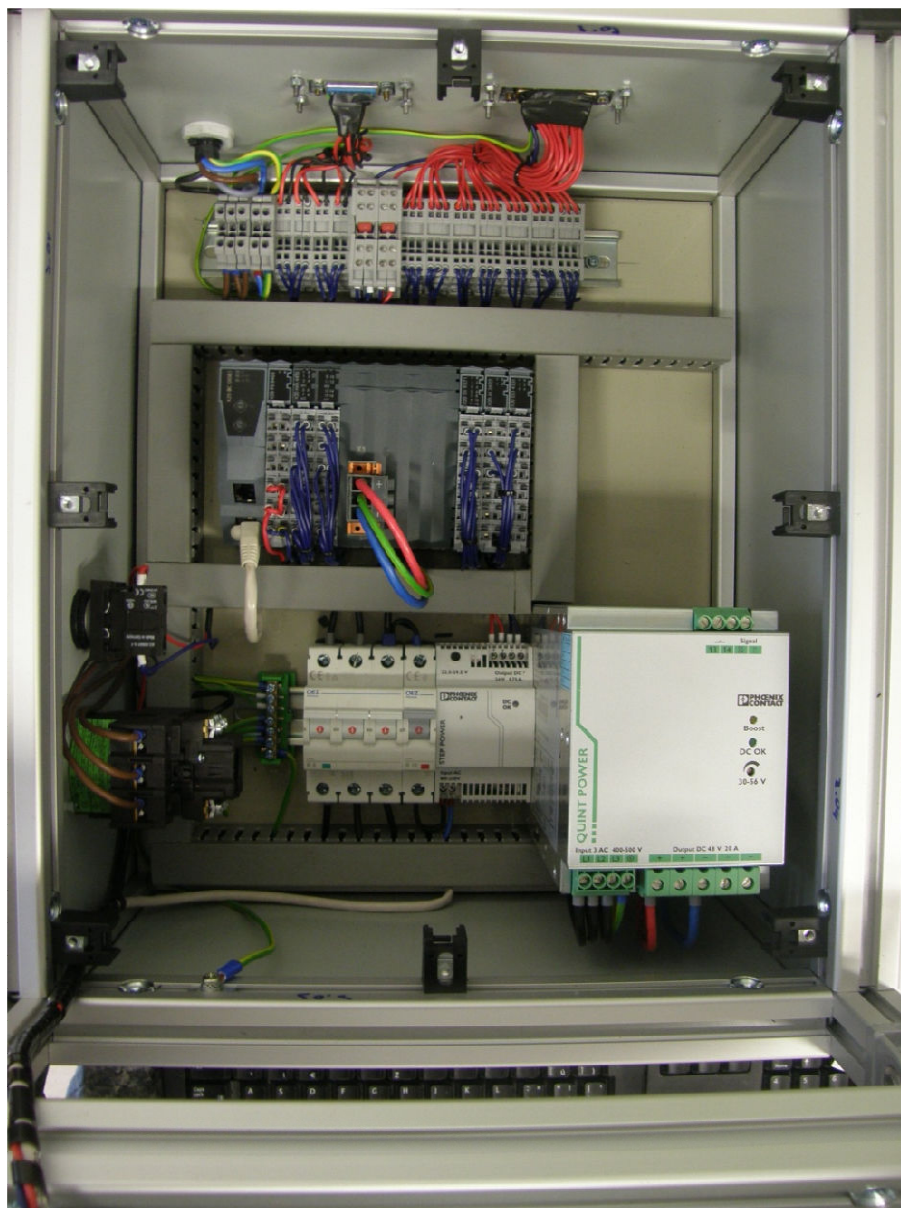
Příloha č. 3 - Rozmístění komponent v rozvaděči



Příloha č. 4 - Zrealizovaný rozvaděč



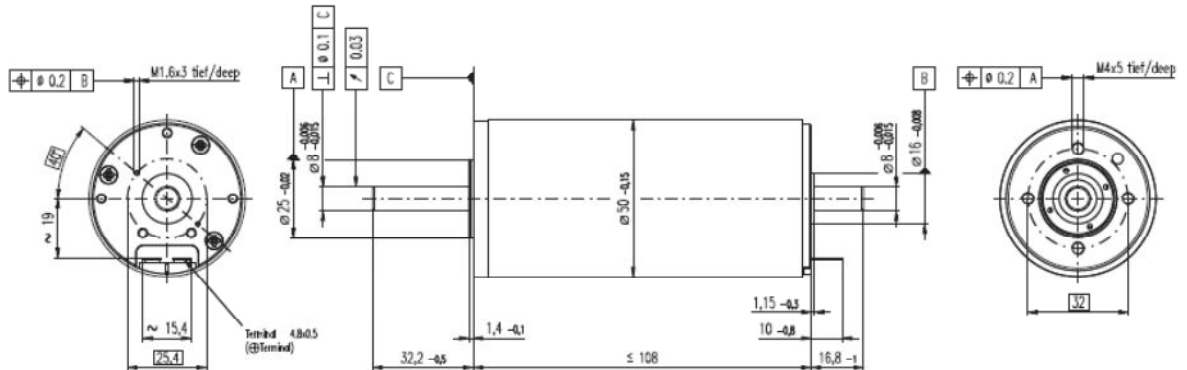
Příloha č. 5 - Vnitřní uspořádání rozvaděče



Příloha č. 6 - Datasheet motoru Maxon RE 50

RE 50 Ø50 mm, Graphite Brushes, 200 Watt

NEW



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Order Number

370354 370355 370356 370357

Motor Data (provisional)

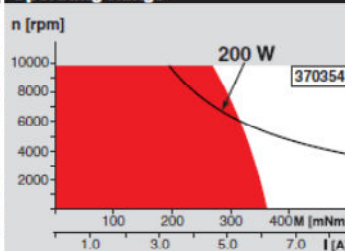
Values at nominal voltage				
1 Nominal voltage	V	24	36	48
2 No load speed	rpm	5778	5778	4865
3 No load current	mA	248	166	100
4 Nominal speed	rpm	5538	5538	4615
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	349	349	356
6 Nominal current (max. continuous current)	A	9.04	6.03	3.88
7 Stall torque	mNm	8416	8416	6956
8 Starting current	A	212	142	74
9 Max. efficiency	%	93	93	91
Characteristics				
10 Terminal resistance	Ω	0.113	0.254	0.649
11 Terminal inductance	mH	0.094	0.211	0.528
12 Torque constant	mNm / A	39.6	59.4	94.1
13 Speed constant	rpm / V	241	161	102
14 Speed / torque gradient	rpm / mNm	0.687	0.687	0.700
15 Mechanical time constant	ms	4.20	4.20	4.24
16 Rotor inertia	gcm ²	584	584	578

Specifications

Thermal data	
17 Thermal resistance housing-ambient	3.81 K / W
18 Thermal resistance winding-housing	2.27 K / W
19 Thermal time constant winding	137 s
20 Thermal time constant motor	406 s
21 Ambient temperature	-30 ... +100°C
22 Max. permissible winding temperature	+125°C
Mechanical data (preloaded ball bearings)	
23 Max. permissible speed	9800 rpm
24 Axial play at axial load < 12 N	0 mm
	> 12 N 0.1 mm
25 Radial play	0.03 mm
26 Max. axial load (dynamic)	30 N
27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	150 N 6000 N
28 Max. radial loading, 15 mm from flange	110 N

Values listed in the table are nominal.
Explanation of the figures on page 49.

Operating Range

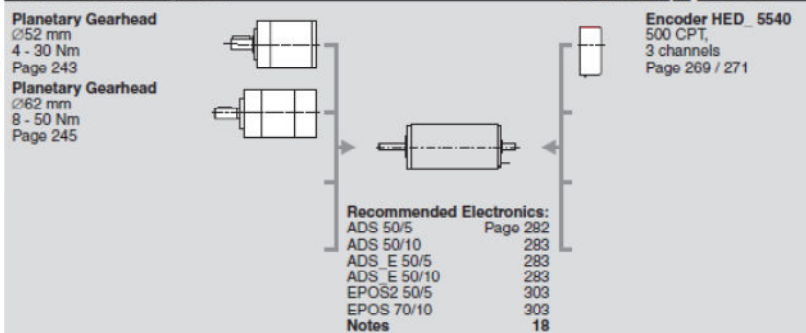


Comments

- Continuous operation**
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation**
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- **Assigned power rating**

maxon Modular System

Overview on page 16 - 21



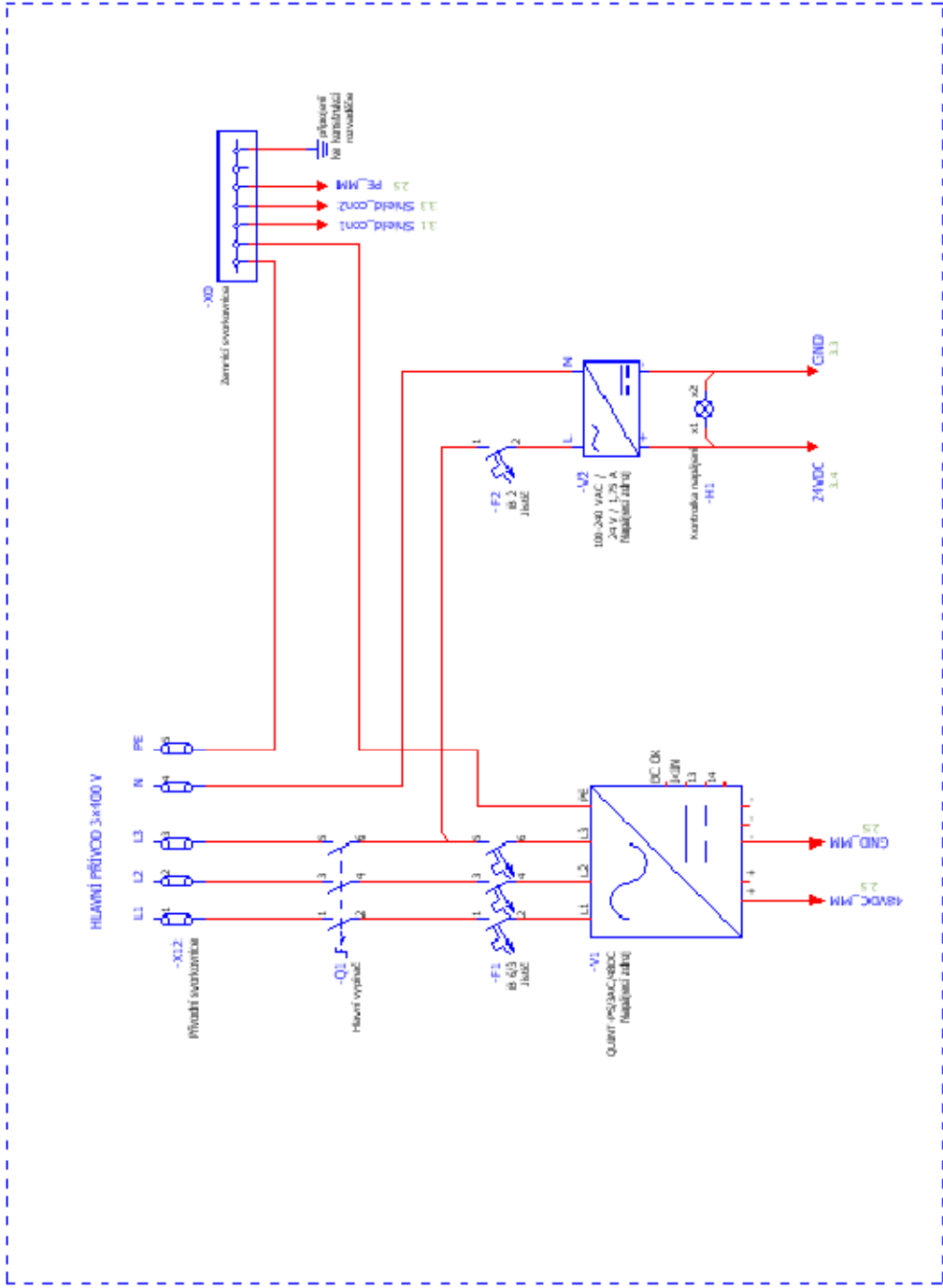
Příloha č. 7 - Elektrotechnická dokumentace

Seznam listů elektrotechnické dokumentace

Napájení	list 1
Zapojení řídicího systému B&R	list 2
Konektory a svorkovnice řídicího rozvaděče	list 3
Schéma zapojení podružného rozvaděče	list 4
Pohon osy X	list 5
Pohon osy Y	list 6
Pohon osy Z	list 7
Popis zapojení přípojovací svorkovnice podružného rozvaděče	list 8

NAPÁJENÍ

-U1
(2,0
/3,0



KONEKTORY A SVORKOVNICE ŘÍDÍCÍHO ROZVADĚČE

konektory pro propojení s pomocným rozváděčem
(umístění na zadní straně řídicího rozvaděče)

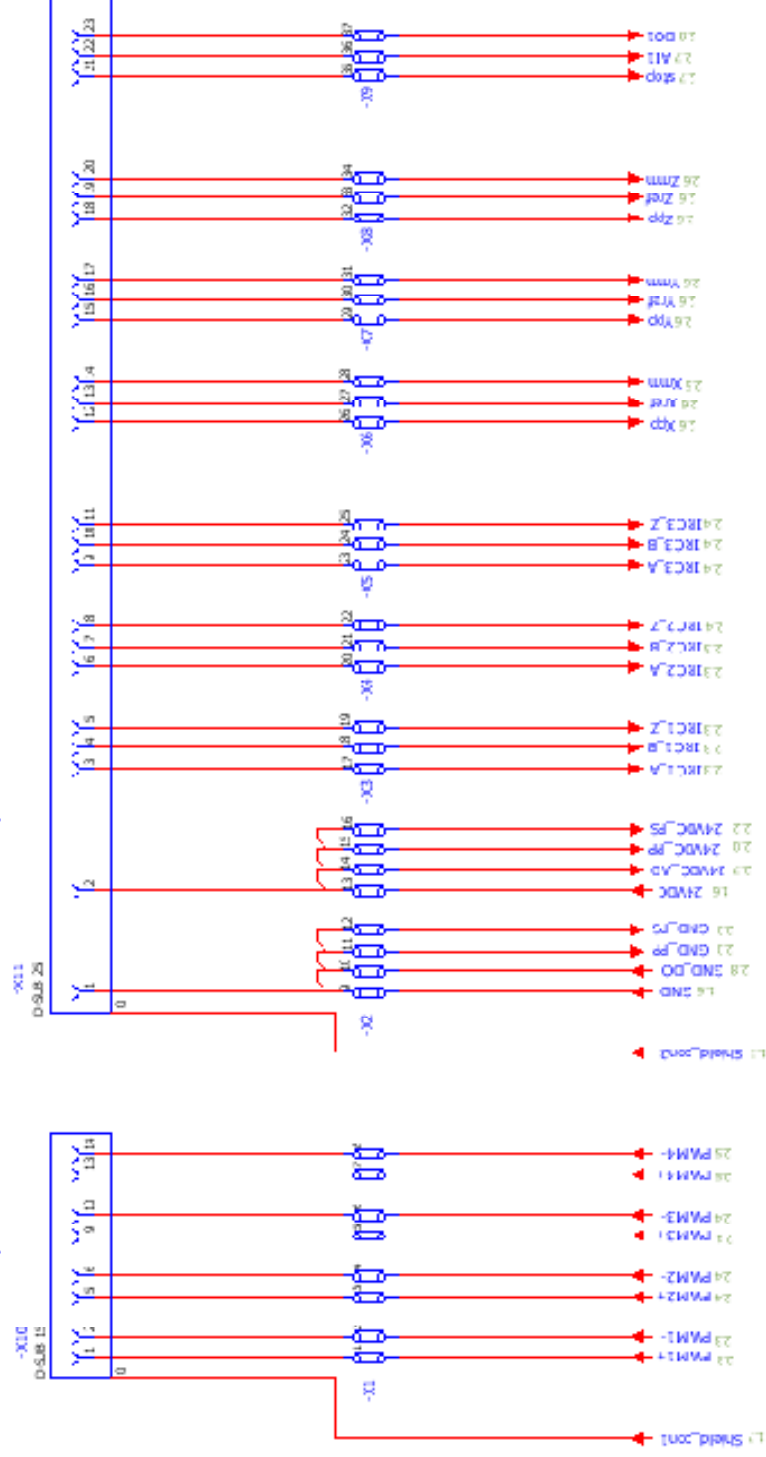
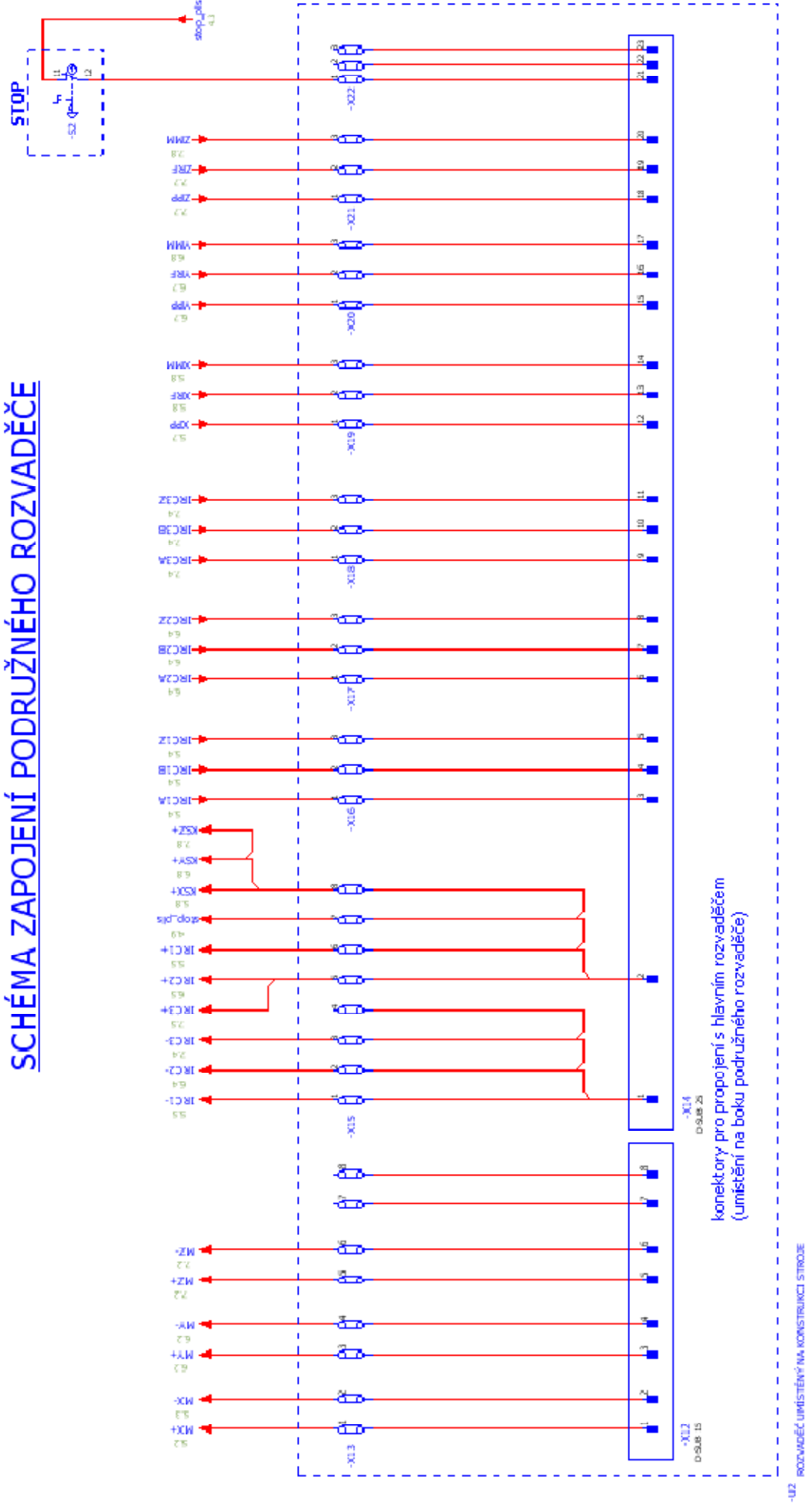
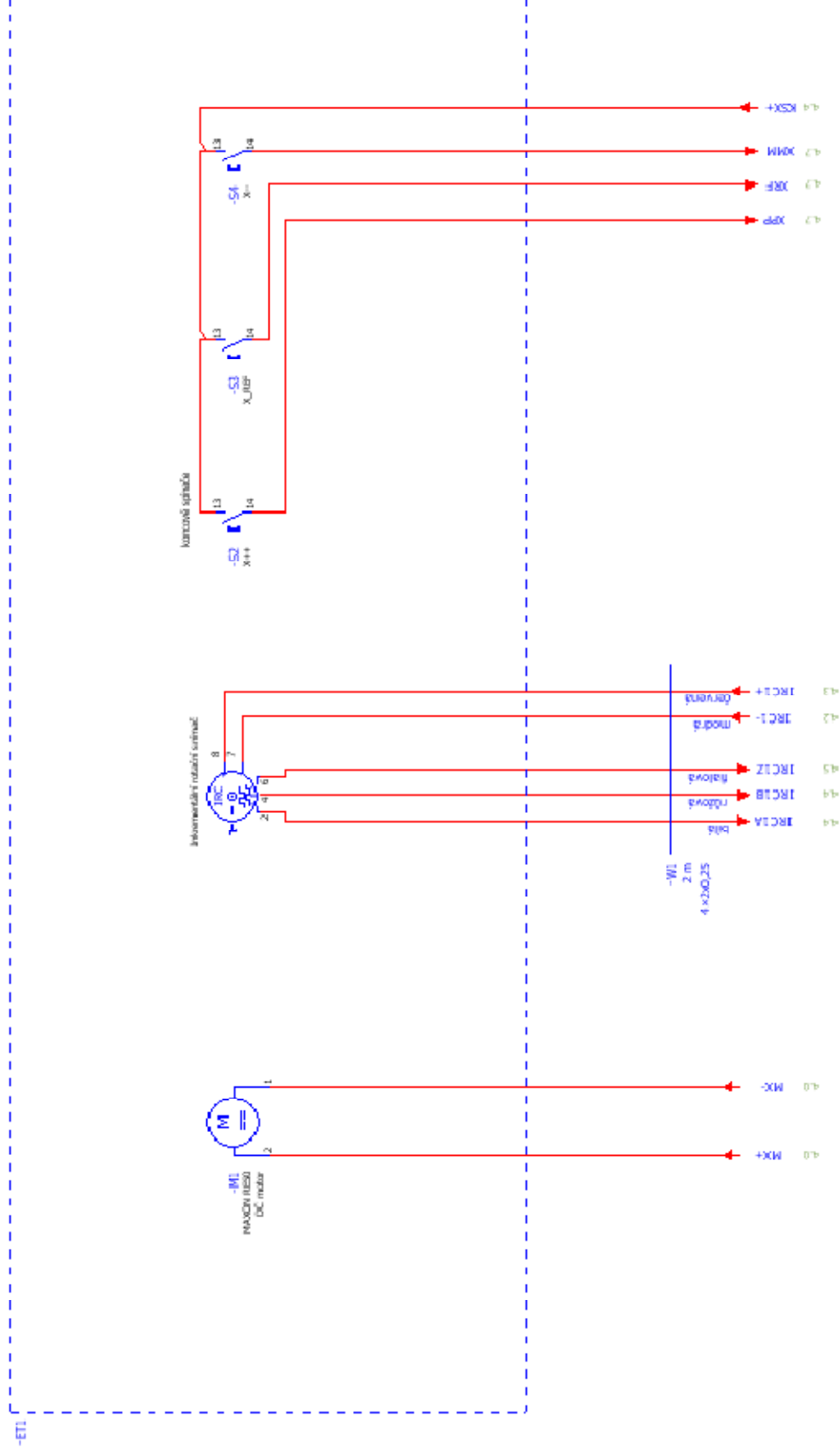


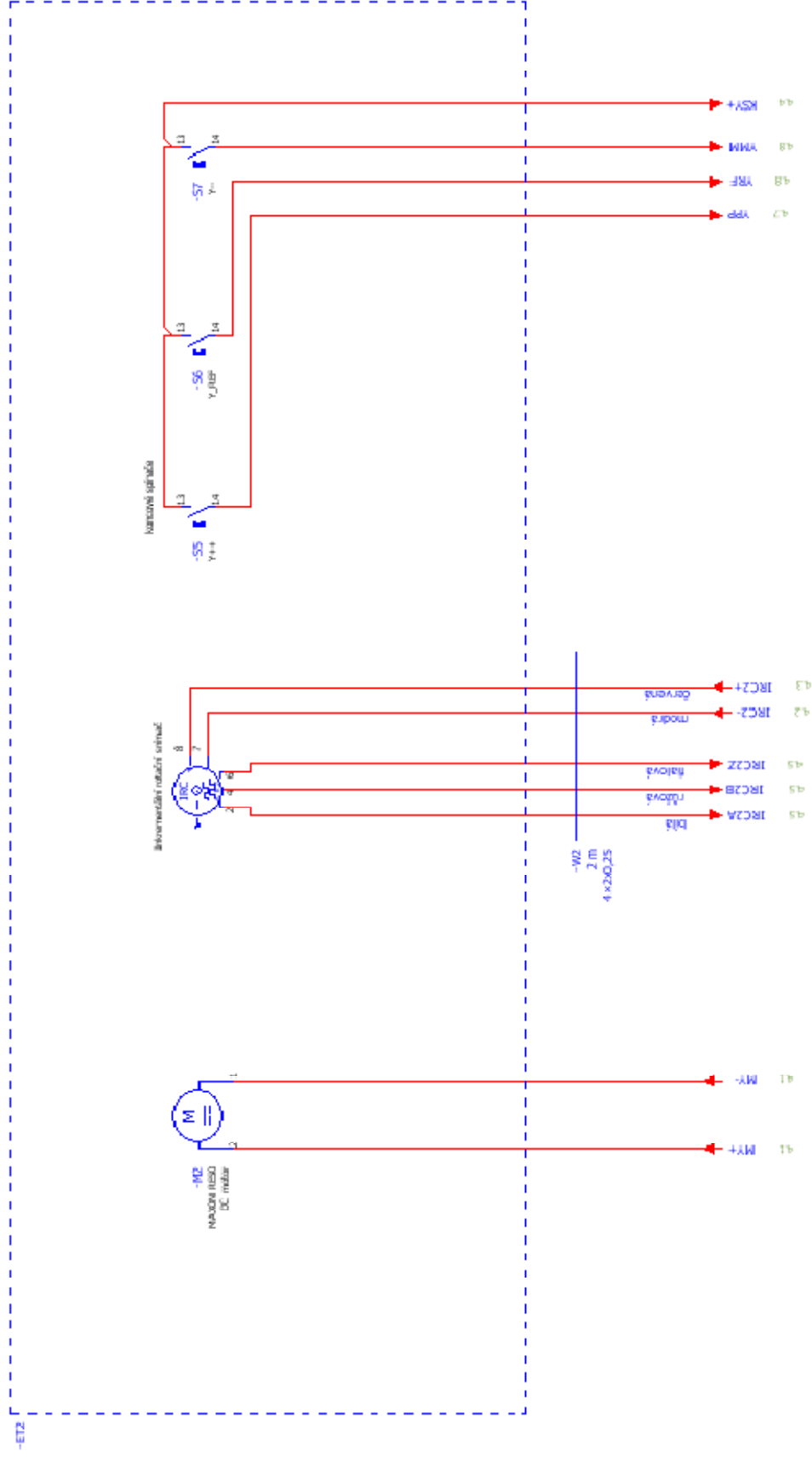
SCHÉMA ZAPOJENÍ PODRUŽNÉHO ROZVADĚČE



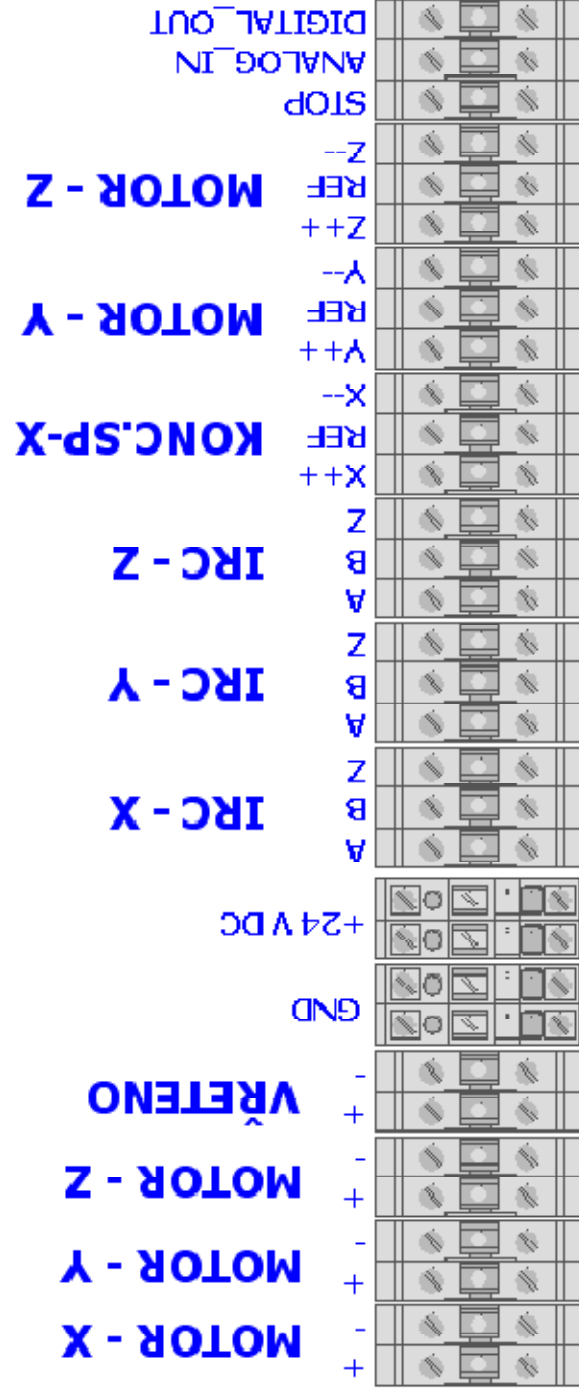
POHON OSY X



POHON OSY Y

[illegible]

POPIS ZAPOJENÍ PŘIPOJOVACÍ SVORKOVNICE PODRUŽNÉHO ROZVADĚČE



Příloha č. 8 - Přiložené CD

Součástí diplomové práce je přiložené CD obsahující tyto adresáře:

- **Text**
tato práce v digitální podobě
- **El_dokumentace**
dokumentace k elektrickému zapojení (projekt v programu EPLAN)
- **Software pro ovládání CNC**
vytvořená část programu zajišťující ovládání CNC
- **Fotodokumentace**
detailní fotografie celého zařízení